

COMPARACIÓN DE LA APLICACIÓN DE DOS PROCESOS DE OXIDACIÓN  
AVANZADA: FOTOFENTON Y FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA EN LA  
REMOCIÓN DE DQO DE LIXIVIADO MADURO DEL RELLENO SANITARIO EL  
HENEQUÉN

KATHERINE FATIMA BUZÓN HERRERA  
ANDREA CAROLINA PONCE ARROYO

UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES  
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
BARRANQUILLA  
2014

COMPARACIÓN DE LA APLICACIÓN DE DOS PROCESOS DE OXIDACIÓN  
AVANZADA: FOTOFENTON Y FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA EN LA  
REMOCIÓN DE DQO DE LIXIVIADO MADURO DEL RELLENO SANITARIO EL  
HENEQUÉN

KATHERINE FATIMA BUZÓN HERRERA  
ANDREA CAROLINA PONCE ARROYO

Trabajo de grado  
Para obtener el título de  
Ingeniero Ambiental

Asesores

Faisal Bernal Higuita  
Rubén Cantero Rodelo

UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC  
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES  
PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL  
BARRANQUILLA  
2014

Nota de aceptación

448

Eliana Vergara V

Firma del Presidente del Jurado

Ginny Vasquez Nuñez

Firma del Jurado

Roberto Cordero R

Firma del Jurado

Barranquilla, 22 de Octubre de 2014

## DEDICATORIA

A Dios por estar conmigo en cada paso que doy, por guiarme en el camino, por darme la Fe y Fortaleza para seguir adelante y no desfallecer ante los problemas.

A la Virgen de Fátima por estar a mi lado guiándome y protegiéndome.

A mis padres por su amor, comprensión y apoyo en todo momento. Por haber hecho de mí una persona con valores y principios. Gracias por hacer realidad este sueño.

A mis hermanos por estar siempre a mi lado cuando los necesitaba, por su amor y apoyo total.

A el Ángel que ahora está desde el cielo cuidándome, por su amor y apoyo incondicional.

Katherine Buzón Herrera

## DEDICATORIA

Le agradezco a Dios, por acompañarme y guiarme en este camino que emprendí hace algún tiempo y que finalice gracias a la fortaleza que me dio para seguir adelante.

A mi Mama, por ser mi motivación para ser cada día mejor persona, mujer y profesional. Gracias por darme tu amor y comprensión incondicional, estas hojas son pocas para agradecerte lo que hoy soy. Te amo.

A mi padre, por confiar en mí y en mis capacidades, sé que siempre estuviste a mi lado, y sé que estas orgulloso de mí.

A mis hermanas, por brindarme su apoyo y soporte durante toda mi carrera. Karen hoy soy lo que soy gracias a ti, a tu lucha y entrega por salir adelante, hoy hermana te dedico este triunfo a ti.

A mi amigo, compañero y Mor, mis triunfos son tus triunfos, gracias por estar a mi lado siempre.

A mi compañera Katherine Buzón, porque emprendimos juntas un camino hace mucho tiempo, lo interrumpimos y aquí estamos culminándolo, gracias porque me enseñaste a no desfallecer y perder mi Fe.

A mi familia, por estar siempre al tanto de mí, porque su apoyo fue muy importante para continuar mi camino.

Andrea Ponce Arroyo

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darnos la fortaleza y sabiduría para seguir adelante y cumplir con nuestro proyecto profesional.

A nuestro tutor Ingeniero Faisal Bernal Higueta, por ser nuestro apoyo y guía en todo nuestro proceso académico.

Al ingeniero Rubén Cantero Rodelo, por acompañarnos en nuestro camino en el proceso de formación profesional.

A nuestros Docentes, por brindarnos su conocimiento durante nuestro proceso académico y que nos fue de gran instrumento para el desarrollo de nuestro proyecto de grado.

A las Laboratoristas Erika Arbeláez y Ana Belén Villalobos, por su gran colaboración y entrega en todo momento con nosotras.

## RESUMEN

El siguiente proyecto de investigación se realizó con la finalidad de evaluar y compararla eficiencia de dos procesos de oxidación avanzada utilizando una fuente de luz artificial para la remoción de DQO para el tratamiento de lixiviados maduros. Los procesos aplicados fueron Foto Fenton y Fotocatálisis Heterogénea, los cuales dieron como resultado porcentajes positivos en el índice de reducción de DQO. Además de esto, contiene sistema metodológico para el diseño y construcción de un reactor experimental escala laboratorio tipo Bach.

**Palabras claves:** Oxidación avanzada, Lixiviado, Foto Fenton, Fotocatálisis Heterogénea, Demanda Química de Oxígeno (DQO).

## **ABSTRACT**

The following research project was conducted in order to evaluate and compare the efficiency of two advanced oxidation processes using an artificial light source for COD removal for the treatment of mature leachate. Processes were applied fenton and photo heterogeneous photocatalysis, which resulted in positive index percentages of reduction of COD. Besides this, contains a methodological framework for the design and construction of a laboratory scale experimental reactor type Bach.

**Keywords:** Advanced Oxidation, Leaching, photofenton, Heterogeneous Photocatalysis, Chemical Oxygen Demand (COD).



## CONTENIDO

pág.

<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>17</b>
<b>1. PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>19</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>22</b>
2.1 Objetivo General.....	22
2.2 Objetivos específicos.....	22
<b>3. JUSTIFICACION.....</b>	<b>23</b>
<b>4. MARCO CONTEXTUAL .....</b>	<b>24</b>
<b>5. MARCO TEORICO .....</b>	<b>26</b>
5.1 RELLENOS SANITARIOS.....	26
5.2 REACCIONES QUE OCURREN EN LOS RELLENOS SANITARIOS .....	26
5.2.1 Reacciones Biológicas. ....	26
5.2.2 Reacciones Químicas.....	27
5.2.3 Reacciones Físicas. ....	27
5.3 LIXIVIADO .....	28
5.4 TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS .....	30
5.4.1 Procesos biológicos.....	32

5.5	PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA .....	34
5.5.1	Mecanismos de reacción. ....	37
5.5.2	Características de lo POA's. ....	38
5.5.3	Clasificación de los POA's. ....	39
5.6	PROCESO FENTON Y FOTO-FENTON .....	43
5.6.1	Principio del Proceso Fenton. ....	43
5.6.2	Principio del proceso Foto-Fenton. ....	45
5.7	PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO .....	47
5.7.1	pH. ....	47
5.7.2	Influencia de la concentración inicial de Peróxido de Hidrógeno. ....	47
5.7.3	Efecto de la concentración de sal de hierro. ....	47
5.7.4	Temperatura. ....	48
5.7.5	Concentración de aniones inorgánicos. ....	48
5.7.6	Intensidad de luz. ....	48
5.8	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO .....	50
5.9	FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA .....	51
5.9.1	Principios de la fotocatalisis heterogénea. ....	52
5.9.2	Parámetros que influyen en el proceso. ....	56
<b>6.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>61</b>
6.1	RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA .....	61
6.2	PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS .....	62

6.4 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO .....	64
6.6 CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR TIPO BACH.....	65
6.8 DISEÑO EXPERIMENTAL .....	70
<b>7. RESULTADOS.....</b>	<b>72</b>
7.1 PROCESO DE FOTO FENTON .....	72
7.2 PROCESO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA .....	74
<b>8. ANALISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>76</b>
<b>9. CONCLUSION .....</b>	<b>79</b>
<b>10. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>80</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>81</b>

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Valores típicos de la composición de lixiviados procedentes de vertederos nuevos y maduros.....	30
Tabla 2. Sistemas de tratamiento Aerobio .....	32
Tabla 3. Sistemas de tratamiento Anaerobio .....	33
Tabla 4. Resultados de los trabajos que comparan el tratamiento aerobio y anaerobio de lixiviados de vertederos de RSU .....	33
Tabla 5. Potenciales de oxidación de las distintas especies químicas .....	36
Tabla 6. Clasificación de los POA's .....	40
Tabla 7. Ventajas y Desventajas de la combinación de UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....	42
Tabla 8. Constantes de velocidad de reacción a diferentes irradiaciones espectrales.....	50
Tabla 9. Ventajas y Desventajas del proceso Fenton .....	50
Tabla 10. Parámetros y equipos de medición .....	62
Tabla 11. Materiales y Equipos.....	64
Tabla 12. Valores de FeSO <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> en la muestra 1.....	72
Tabla 13. Valores de FeSO <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> en la muestra 2.....	73
Tabla 14. Valores de FeSO <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> en la muestra 3.....	73
Tabla 15. Valores de TiO <sub>2</sub> en la muestra 1 .....	74
Tabla 16. Valores de TiO <sub>2</sub> en la muestra 2 .....	75
Tabla 17. Valores de TiO <sub>2</sub> en la muestra 3 .....	75
Tabla 18. Porcentajes de remoción Proceso Foto Fenton .....	76
Tabla 19. Porcentaje de remoción Proceso Fotocatálisis Heterogénea.....	77

## LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Gráfica 1. Concentración vs Eficiencia del proceso Foto Fenton.....	76
Gráfica 2. Concentración vs Eficiencia del proceso Fotocatálisis Heterogénea ....	77
Gráfica 3. Comparación de los procesos: FotoFenton y Fotocatálisis Heterogénea en la remoción de DQO .....	78

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Acción del radical hidroxilo sobre fenol.....	36
Figura 2. Proceso Fenton .....	43
Figura 3. Rutas de reacción del proceso Foto Fenton .....	46
Figura 4. Mecanismo de reacción Foto Fenton en la generación de radicales hidroxilo .....	49
Figura 5. Procesos que ocurren en la interfaz semiconductor- electrolito bajo iluminación .....	52
Figura 6. Activación de una partícula semiconductor en un proceso fotocatalítico .....	53
Figura 7. Evolución de los pares $e^-$ - $h^+$ dentro de la partícula de un semiconductor .....	55
Figura 8. Influencia de la longitud de onda (A) y de la intensidad (B) de la radiación incidente en la velocidad de reacción observada.....	58
Figura 9. Influencia de la concentración inicial de contaminantes sobre la velocidad de una reacción fotocatalítica .....	59

## LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Estructura física del reactor .....	63
Diagrama 2. Vista alzada interna del recorrido .....	63
Diagrama 3. Vista Alzada.. .....	65
Diagrama 4. Vista alzada interna del reactor .....	66
Diagrama 5. Concentraciones para el proceso Foto Fenton.....	70
Diagrama 6. Concentraciones para el proceso de Fotocatálisis Heterogénea .....	71

## LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Relleno Sanitario "El Henequén" .....	24
Imagen 2. Piscina 1 - Relleno Sanitario... ..	64
Imagen 3. Recipiente plástica.....	61
Imagen 4. Estructura física del reactor .....	65
Imagen 5. Instalación de Ángulos de 90°.....	65
Imagen 6. Cubrimiento de ángulos .....	69
Imagen 7. Cubrimiento de ángulos .....	66
Imagen 8. Recorrido de reactor .....	67
Imagen 9. Recubrimiento con tela lamicel Perol .....	67
Imagen 10. Pruebas preliminares .....	68
Imagen 11. Reactor final - tipo Bach.....	68
Imagen 12. Vista externa del reactor .....	69
Imagen 13. Vista en planta del recorrido interno del reactor.....	69



## INTRODUCCION

Desde hace mucho tiempo una de las soluciones más implementadas a nivel mundial sobre la disposición final de los residuos sólidos generados en las ciudades por las diversas actividades, son los rellenos sanitarios, los cuales están ubicados en terrenos rurales alejados de las zonas residenciales. Esta actividad consiste en sepultar los residuos sólidos por niveles, separados por geomembranas las cuales tienen como función mantener y evitar que los residuos se mezclen y que el lixiviado que se genera debido a la descomposición de los residuos se infiltre o escurra en el suelo y subsuelo. El lixiviado es un líquido que está altamente contaminado ya que está conformado por una gran diversidad de sustancias que poseen altas concentraciones de nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) y materia orgánica, además de otros compuestos inorgánicos (Bae J.H., 1997 ).<sup>1</sup>

Los lixiviados se clasifican en, joven y maduro o viejo, estos se diferencian debido a las características fisicoquímicas que posee cada uno de ellos. Para la implementación de cualquier proceso para el tratamiento de lixiviados, se recomienda realizar una caracterización inicial que permita identificar y establecer el tipo de lixiviado a tratar para que de esta forma se logre seleccionar el proceso más adecuado para ese tipo de lixiviado.

En el caso del lixiviado joven, estos se caracterizan por tener una relación de  $\text{DBO}_5/\text{DQO} > 0.4$ , los cuales son ricos en ácidos grasos volátiles. Este tipo de lixiviados son tratados con procesos biológicos (anaerobios y aerobios) como por ejemplo, tratamiento con lagunas, lodos activados, filtros percoladores y reactores anaerobios de película fija, este tipo de tratamientos son especialmente eficientes en la remoción de materia orgánica biodegradable del lixiviado joven (Amokrane A., 1997)<sup>2</sup>.

Por el contrario, el lixiviado maduro se caracteriza por poseer concentraciones bastante altas de N-amoniacal (20 – 40mg/L), alcalinidad (200 – 1000 mg/L) y pH (6.6 – 7.5), además de esto, tienen concentración bajas de DBO (100 – 200) y altas concentraciones de DQO (100 – 700), en consecuencia, la relación de biodegradabilidad  $\text{DBO}/\text{DQO}$  regularmente es menor que 0.1.

---

<sup>1</sup> Bae J.H., Kim S.E., Chang H.S. (1997). Treatment of landfill leachates: ammonia removal via nitrification and denitrification and further COD reduction via Fenton's treatment followed by activated sludge. *Water Science and Technology*, 36(12):341-348.

<sup>2</sup> Amokrane A., Comel C., Verón, J. (1997). Landfill leachate by coagulation-flocculation. *Water Research*, 31(11):2775-2782.

Es decir, es mucho menor que en los lixiviados jóvenes que es de 0.4 -1, debido a que la DBO disminuye significativamente y la concentración de metales y sales disueltas aumenta, mientras que la coloración se torna café oscuro o amarillenta (E., 2001 ).<sup>3</sup>

Teniendo en cuenta la baja relación de biodegradabilidad de los lixiviados maduros y la presencia de sustancias recalcitrantes, los tratamientos biológicos para este tipo de lixiviados no son muy eficientes, por tal razón se han aplicado otras opciones de tratamiento como son los Procesos de Oxidación Avanzada, POA's, los cuales son procesos fisicoquímicos que involucran la generación y uso de especies transitorias altamente reactivas, principalmente el radical hidroxilo ( $\text{HO}\cdot$ ) que posee alta efectividad para la oxidación de la materia orgánica. Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por otras formas de energía, suministrando un incremento en la velocidad de reacción en el tratamiento de agua contaminada (Domènech X., 2001).<sup>4</sup>

En esta oportunidad se trabajara con el lixiviado del relleno sanitario “El Henequén” ubicado en la ciudad de Barranquilla en el departamento del Atlántico entre la Vía Circunvalar y la Carrera 46 kilómetro 2; vereda Las Nubes, el cual en la actualidad no existe un sistema de tratamiento que permita la remoción de la DQO. El lixiviado generado en el relleno El Henequén es un lixiviado maduro con valores de DQO entre (33,5 – 761 mg/L)  $\text{DBO}_5$  (21,0 – 150,0 mg/L) por lo que tiene una baja biodegradabilidad y es candidato a ser tratado con POA's.

---

<sup>3</sup> Giraldo E. (2001). Revista de Ingeniería. En: Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances recientes. Universidad de los Andes pág., 14.

<sup>4</sup> Domènech X., Jardim W.F., Litter M.I. (2001). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. Monografía: Eliminación de contaminantes por fotocátalisis heterogénea. Cooperación Iberoamericana. Barcelona, España.

## 1. PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los problemas relacionados con la contaminación ambiental es el ocasionado por el lixiviado que se genera en los rellenos sanitarios, debido a que el lixiviado es el líquido residual que se genera por la percolación de agua a través de los residuos sólidos en el proceso de degradación, lo cual da lugar a la aparición de unas corrientes líquidas caracterizadas principalmente por un gran número de sustancias con altas concentraciones de Nitrógeno amoniacal, Nitrógeno orgánico, carga orgánica y metales pesados, Tales como: (Cd), Níquel (Ni), Zinc (Zn) y plomo (Pb).

Dada la peligrosidad de los lixiviados, regularmente son tratados para remover o transformar los contaminantes y así disminuir el impacto negativo generado sobre el medio para que sea menor, y además se conviertan en una de las alternativas para su reutilización como lo ha sido el sistema de riego en las áreas comunes.

Sobre los procesos de tratamiento de lixiviados empleados en algunos rellenos sanitarios en Colombia, se encontró que estos emplean una combinación de procesos biológicos y fisicoquímicos, tal es el caso del Parque Ambiental “Los Pocitos” en la ciudad de Barranquilla, Departamento del Atlántico, el cual posee un sistema de tratamiento conformado por un desarenador, lagunas de sedimentación, tratamiento biológico y tratamiento fisicoquímico; y el relleno sanitario “Doña Juana” en la ciudad de Bogotá, Departamento de Cundinamarca, el cual cuenta con tratamiento biológico mixto (aerobio y anaerobio) encargado de la remoción de materia orgánica y tratamientos fisicoquímicos encargados de la estabilización de metales pesados. Esta combinación de procesos es necesaria para lograr una eficiente remoción de los contaminantes presentes en el lixiviado, lo que permite cumplir con los requerimientos ambientales exigido por la autoridad ambiental en Colombia.

Teniendo en cuenta la baja relación de biodegradabilidad de los lixiviados maduros y la presencia de sustancias recalcitrantes, los tratamientos biológicos para este tipo de lixiviados no son muy eficientes, por tal razón se han aplicado otras opciones de tratamiento como son los Procesos de Oxidación Avanzada, POA's, los cuales son procesos fisicoquímicos que involucran la generación y uso de especies transitorias altamente reactivas, principalmente el radical hidroxilo ( $\text{HO}\cdot$ ) que posee alta efectividad para la oxidación de la materia orgánica. Este radical puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar) o por

otras formas de energía, suministrando un incremento en la velocidad de reacción en el tratamiento de agua contaminada (Doménech X., 2001)<sup>5</sup>.

Existen experiencias de investigación para el tratamiento de lixiviados maduros usando POA's [(Otero Rozzo., 2013)<sup>6</sup> (Escudero Santiago., 2012)<sup>7</sup> (Cerde Sandoval., 2007)<sup>8</sup>], en estas se han realizado pruebas de POA's, a los lixiviados mediante la aplicación del proceso Foto-fenton a diferentes concentraciones de Peróxido de Hidrógeno y Sulfato Ferroso y pruebas con Fotocatálisis Heterogénea (Óxido de Titanio), sin embargo, cada lixiviado requiere un proceso de evaluación ya que cada uno posee unas características particulares dependiendo de las condiciones en que se genera (Tchobanoglous G., 1994)<sup>9</sup>.

En coherencia con lo anterior, la implementación de nuevas técnicas, tecnologías y procesos, ayuda al desarrollo y crecimiento del país y a su vez contribuye a la consolidación de la comunidad científica, con un enfoque principal que se basa en brindar alternativas de solución al problema presentado por el mal manejo de los lixiviados, y de esta manera cumplir con la legislación ambiental Colombiana, en especial, los Decretos 1713 de 2002, Decreto 838 de 2005, 1594 de 1984 y 3930 de 2010. Desde el punto de vista científico, se busca conocer la opción de tratamiento de POA's que remueva un mayor porcentaje de contaminantes refractarios medidos con la DQO para lixiviados con las características propias del generado en el relleno sanitario "El Henequén". Las opciones de POA a aplicar son; Foto Fenton con la aplicación de sulfato ferroso y peróxido de hidrogeno con radiación de luz ultra violeta ( $\text{FeSO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$  +/UV) y Fotocatálisis heterogénea con dióxido de Titanio con luz ultravioleta ( $\text{TiO}_2$ +UV).

En esta oportunidad se trabajara con el lixiviado generado en el relleno sanitario "El Henequén", en la ciudad de Barranquilla en el departamento del Atlántico, ubicado entre la Vía Circunvalar y la Carrera 46 kilómetro 2; vereda Las Nubes, el cual actualmente se encuentra clausurado y además no cuenta con un sistema de tratamiento que permita la remoción de la DQO en el lixiviado. Iniciando con el conocimiento del tiempo de permanencia del lixiviado, la caracterización inicial y comparando la bibliografía consultada, el lixiviado que se generó en el relleno

---

<sup>5</sup> Doménech. Op. cit., p. 75

<sup>6</sup> Otero Rozzo Angélica., 2013. Determinación de la eficiencia de remoción de la DQO del lixiviado maduro del relleno El Henequén tratado con oxidación avanzada foto-fenton. Colombia

<sup>7</sup> Escudero Santiago Carlos., 2012. Tratamiento de lixiviados provenientes de un vertedero de residuos sólidos urbanos mediante la aplicación de sistemas fisicoquímicos a escala laboratorio. México.

<sup>8</sup> Cerde Sandoval Ivonne., 2007. Aplicación de Foto fenton a lixiviados de rellenos sanitarios. México.

<sup>9</sup> Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil S. (1994). Gestión integral de residuos sólidos. Volumen I. McGraw-Hill. Madrid, España.

sanitario “El Henequén” es de clasificación Maduro, ya que posee valores de DQO entre (33,5 – 761 mg/L), DBO<sub>5</sub> (21,0 – 150,0 mg/L), por lo que tiene una baja biodegradabilidad y es candidato a ser tratado con POA’s.

Teniendo en cuenta las opciones de POA’s empleadas para el tratamiento de este tipo de lixiviados, surge la inquietud.

¿Cuál proceso de oxidación avanzada, Foto Fenton o Fotocatálisis Heterogénea, obtiene la mayor eficiencia de remoción de DQO en el tratamiento del lixiviado maduro del Relleno Sanitario “El Henequén”?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

- Evaluar la eficiencia de dos Procesos de Oxidación Avanzada: Foto Fenton y Fotocatálisis Heterogénea en la remoción de DQO del lixiviado del Relleno Sanitario “El Henequén”.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar el lixiviado proveniente del relleno sanitario “El Henequén”, para identificar el tipo de lixiviado que se va a tratar.
- Establecer los valores de concentración de Sulfato Ferroso y Peróxido de Hidrógeno a pH neutro en el sistema Foto Fenton donde se obtenga la mayor eficiencia de remoción de DQO al tratar el lixiviado del relleno sanitario “El Henequén”.
- Establecer los valores de concentración de Dióxido de Titanio en el sistema de Fotocatálisis Heterogénea donde se obtenga la mayor eficiencia de remoción de DQO al tratar el lixiviado del relleno sanitario “El Henequén”.
- Comparar la eficiencia de los dos procesos, de acuerdo a la eficiencia de remoción de DQO y viabilidad económica de los reactivos.

### **3. JUSTIFICACION**

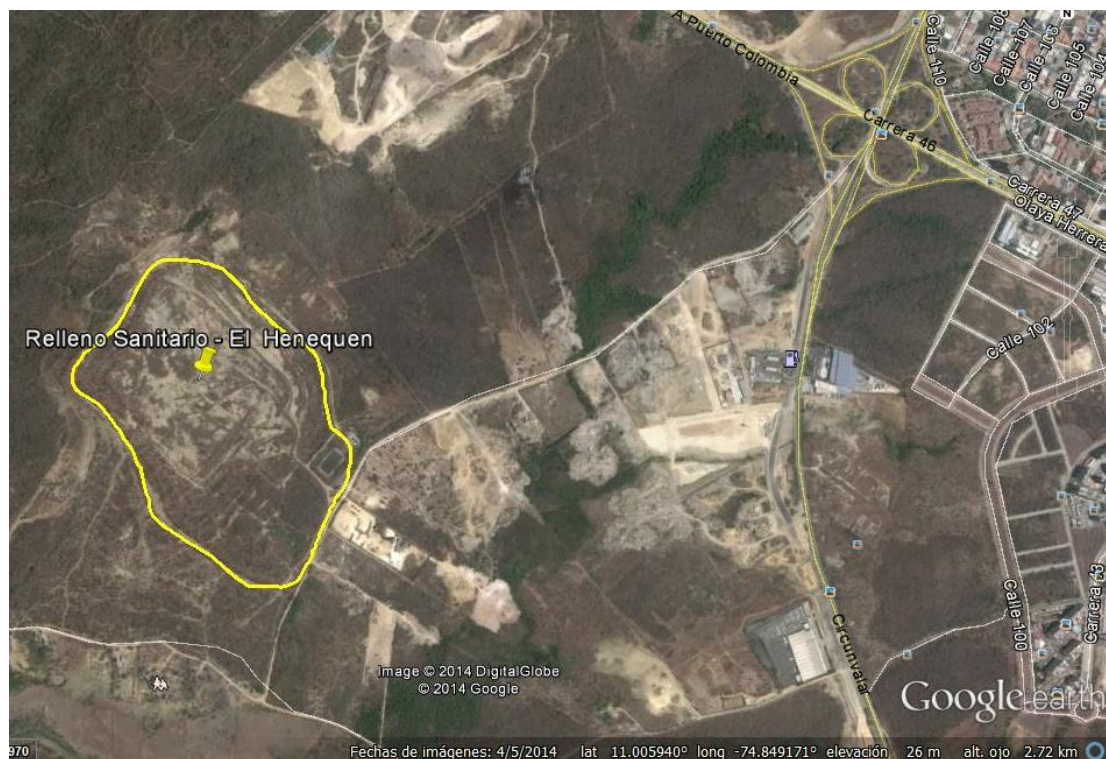
Teniendo en cuenta el manejo de nuevas tecnologías que van enfocadas al tratamiento de lixiviados y que son empleadas en el campo ingenieril en países como España y México, en Colombia se puede evidenciar la falta de información sobre el manejo e implementación de nuevas técnicas para el tratamiento de lixiviados en el país.

Con la realización de este proyecto de investigación se pretende servir como un documento de consulta donde no está simplemente enfocado en determinar el tratamiento más eficaz para la remoción de DQO sino que además, contribuya a la ampliación del conocimiento sobre el manejo de la tecnología POA's para el tratamiento de lixiviados, ya que la aplicación en el país de los tratamientos de oxidación avanzada como lo son Fotocatálisis Heterogénea y Foto Fenton resulta bastante nuevos, debido a que estos procesos son normalmente utilizados para el tratamiento de aguas residuales industriales y no son de uso frecuente para el tratamiento de lixiviados.

#### 4. MARCO CONTEXTUAL

El relleno Sanitario “El Henequén” se encuentra ubicado en la ciudad de Barranquilla en el Departamento del Atlántico, entre la Vía Circunvalar y la Carrera 46, kilómetro 2; vereda Las Nubes, con coordenadas geográficas latitud 11.005940°, longitud -74.849171°, elevación 26m y altitud 2.72m.

Imagen 1. Relleno Sanitario "El Henequén"



Fuente: Google Earth

El relleno sanitario “El Henequén” fue construido en el año de 1990, en ese entonces era operado por las Empresas Públicas Municipales y contaba con un terreno de 19 Ha. Fue diseñado para una vida útil de 7 años, el cual permitió su uso hasta el año 1997.

Desde el año 1992 paso a ser operado por la empresa privada Triple A, y contar con un área de 61,11 Ha, espacio destinado para disponer aproximadamente 1.600 Ton/día de residuos sólidos provenientes de la ciudad de Barranquilla y los municipios de Puerto Colombia, Galapa y Soledad.



En la actualidad el relleno sanitario se encuentra clausurado desde el 1 de Marzo del 2009 (por medio del Decreto 1713 de 2002 por parte de la autoridad ambiental), reportando una vida útil de 19 años.

## 5. MARCO TEORICO

### 5.1 RELLENOS SANITARIOS

“Es el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de los residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados y cobertura final”. (Decreto 1713 de 2002.)<sup>10</sup>

### 5.2 REACCIONES QUE OCURREN EN LOS RELLENOS SANITARIOS

Los residuos sólidos depositados en los rellenos sanitarios sufren cambios biológicos, químicos y físicos, todos interrelacionados entre sí, por esto, es importante conocer cada uno de los procesos y de esta manera entender la dinámica que ocurre en un relleno sanitario, sobre todo en la generación de lixiviado.(Escudero Santiago., 2012)<sup>11</sup>

5.2.1 Reacciones Biológicas. Las reacciones biológicas más importantes que ocurren en los rellenos sanitarios son las que afectan a la materia orgánica de los residuos sólidos urbanos, debido a que generan gases y líquidos como son los lixiviados. Generalmente la descomposición biológica se realiza de manera aerobia durante un corto periodo de tiempo, inmediatamente después de la evacuación de los residuos, hasta que se agota el oxígeno que se encuentra atrapado en el relleno sanitario. Durante la descomposición aerobia el gas principal producido es CO<sub>2</sub>. Una vez que se ha consumido el oxígeno, el proceso pasa a ser anaerobio y la materia orgánica se convierte en CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y cantidades traza de NH<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>S, a la par se suscitan un gran número de reacciones bioquímicas. Los principales responsables de la descomposición son los microorganismos contenidos en el suelo y en los residuos.(Escudero Santiago., 2012)<sup>12</sup>

---

<sup>10</sup> Decreto 1713 de 2002.

<sup>11</sup> Escudero Op. cit, p. 17

<sup>12</sup> Ibid., p18

5.2.2 Reacciones Químicas. Las reacciones químicas más importantes que ocurren en un relleno sanitario son: la disolución y arrastre en suspensión de los materiales de los residuos y de productos de conversión biológica en los líquidos que se filtran a través de los residuos; la evaporación de compuestos químicos y de agua en el gas de relleno; la absorción de compuestos orgánicos volátiles (COV) y semivolátiles en el material vertido; la deshalogenación y descomposición de compuestos orgánicos y reacciones de oxidación-reducción que afectan a metales y a la solubilidad de las sales metálicas.(Escudero Santiago., 2012)<sup>13</sup>

La disolución en el lixiviado de productos de conversión biológica y de otros compuestos, particularmente compuestos orgánicos, es de gran importancia pues estos materiales pueden salir del vertedero con el lixiviado. Posteriormente, estos compuestos orgánicos pueden entrar a la atmósfera a través del suelo, en rellenos que no están recubiertos con geomembranas, o bien a través de instalaciones descubiertas para el tratamiento de lixiviado. Otras reacciones químicas importantes incluyen aquellas que se producen entre ciertos compuestos orgánicos y los revestimientos de arcilla, que pueden alterar la estructura y la permeabilidad del material de revestimiento.(Escudero Santiago., 2012)<sup>14</sup>

5.2.3 Reacciones Físicas. Dentro de las reacciones físicas más importantes que se producen en los rellenos sanitarios están: la difusión lateral de los gases y la emisión de gases de vertedero al ambiente circundante; el movimiento del lixiviado dentro y hacia abajo del vertedero, a través del suelo y el asentamiento causado por la consolidación y descomposición del material vertido. Cuando se está produciendo gas dentro de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos, la presión interna puede crecer, causando roturas en la cobertura del relleno, por tanto escape. (Escudero Santiago., 2012)<sup>15</sup>

El agua que entra en el vertedero a través de la cobertura averiada puede aumentar la velocidad de producción del gas, causando aún más roturas. El gas de vertedero que logre escapar podría llevar al ambiente circundante oligocompuestos cancerígenos y teratogénicos. Como el gas de vertedero suele tener un alto contenido de metano, existe el peligro de combustión y/o explosión. Como el lixiviado migra hacia abajo, puede llevar compuestos y materiales hasta nuevos puntos donde puedan reaccionar con facilidad. El lixiviado se introduce en los poros de aire del vertedero, interfiriendo así en la migración del gas de vertedero.(Tchobanoglous G., 1994)<sup>16</sup>

Es difícil predecir con exactitud las condiciones futuras en un relleno debido al alto número de parámetros que influyen en los procesos, interaccionando

---

<sup>13</sup> Escudero, Op. cit, p 18.

<sup>14</sup> Ibid., p. 18

<sup>15</sup> Ibid., p. 19

<sup>16</sup> Ibid., p. 19

entre sí. Sin embargo, se conoce que las reacciones físicas, químicas y biológicas aumentan con la temperatura y la humedad presentes, hasta alcanzar un límite de presión(Escudero Santiago., 2012)<sup>17</sup>. Además, se contempla que los procesos biológicos que ocurren naturalmente en un sitio de disposición de RSU continuarán mucho después de su clausura sobre los residuos frescos y los que han sido cubiertos. En consecuencia, siempre y cuando las precipitaciones sean significantes, un vertedero continuará produciendo lixiviados contaminados y este proceso podría durar de 30 hasta 40 años, el lapso de tiempo dependerá de la composición de los residuos dispuestos en el vertedero.(Escudero Santiago., 2012)<sup>18</sup>

### 5.3 LIXIVIADO

El lixiviado se genera por la descomposición de los residuos sólidos urbanos por acción de los microorganismos. Esta descomposición provoca una disociación de las macromoléculas orgánicas a formas más sencillas que, pueden ser arrastradas por el agua, formando los lixiviados y diversos compuestos de nitrógeno y fósforo procedentes de la mineralización de la misma materia orgánica.(Escudero Santiago., 2012)<sup>19</sup>

Otro factor que influye en la generación del lixiviado es el clima, debido a que afecta la cantidad de agua que precipita y la pérdida a través de la evaporación, además el lixiviado dependerá de la naturaleza de los residuos, es decir, del contenido de agua, al igual que el grado de compactación del relleno sanitario, ya que generalmente a menor compactación mayor será la generación de lixiviado, debido a que se aumenta la filtración.(Escudero Santiago., 2012)<sup>20</sup>

Los lixiviados son considerados altamente contaminantes, por eso su tratamiento es de vital importancia ya que pueden convertirse en una fuente significativa de contaminación, por ello es necesario remover diversas sustancias, debido a que los lixiviados de rellenos sanitarios contienen altas concentraciones de nitrógeno amoniacal ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) y materiales orgánicos, además de otros compuestos inorgánicos. El  $\text{NH}_4\text{-N}$  puede causar serios problemas, como toxicidad y/o problemas de olor durante los procesos de tratamiento. Cuando el nitrógeno amoniacal no es tratado y es descargado, éste puede estimular el crecimiento de algas, agotar el oxígeno disuelto y crear efectos tóxicos en los ecosistemas acuáticos del cuerpo receptor. (Cerdea, 2007)<sup>21</sup>

---

<sup>17</sup> Escudero, Op. cit, p.19

<sup>18</sup> Ibid., p. 19

<sup>19</sup> Ibid., p.14

<sup>20</sup> Ibid., p. 14

<sup>21</sup> Cerda Op. cit, p. 2-9.

- 5.3.1 Composición del lixiviado. Para que el tratamiento del lixiviado se lleve a cabo de manera satisfactoria es importante conocer que la composición química de los lixiviados varía según la antigüedad del relleno. Las concentraciones de las sustancias en el lixiviado disminuyen continuamente con el tiempo, sin embargo en algunos casos los metales presentan reacciones de óxido-reducción por lo que su concentración al inicio del proceso de lixiviación puede que no sea la mayor. (Giraldo, 2001)<sup>22</sup>

Los lixiviados se clasifican en lixiviado joven, lixiviado maduro y lixiviado viejo. Los lixiviados jóvenes presentan altas concentraciones de N-amoniacal, sales disueltas, metales pesados, carbono orgánico total (COT), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), altas cantidades de ácidos grasos volátiles (AGV), bajos valores de pH y de potencial de oxidación-reducción, al igual que coloración negra (Escudero Santiago., 2012)<sup>23</sup>. La relación de DBO<sub>5</sub>/DQO para estos lixiviados es usualmente de 0.4 a 0.5 o más alta. La concentración de ácidos grasos volátiles también resulta en valores de pH tan bajos como 4. Este ambiente ácido promueve el incremento en las concentraciones de metales en los lixiviados. Para este tipo de lixiviados los tratamientos biológicos (aerobio y anaerobio) son eficientes para reducir el alto contenido orgánico fácilmente degradable.(Cerdea, 2007)<sup>24</sup>

Igualmente se generará lixiviado maduro (tiempo de operación entre 5 y 10 años), estos presentan principalmente una carga orgánica media con una DQO entre 3000 y 15000 mg/L, una biodegradabilidad media (DBO<sub>5</sub>/DQO de 0.1 a 0.3). Valores de pH próximos a 7 y la concentración de ácidos carboxílicos (AGV) que representa del 20 al 30% de la carga orgánica.

Por otra parte los lixiviados viejos (tiempo de operación más de 10 años) se encuentran químicamente estabilizados y los compuestos orgánicos remanentes pueden ser removidos por tratamiento fisicoquímico. (Cerdea, 2007)<sup>25</sup>

Los lixiviados maduro y viejo tienen concentraciones altas de N-amoniacal, alcalinidad y pH, mientras que la DQO es menor que en el lixiviado joven y la DBO disminuye significativamente, la concentración de metales y sales disueltas, mientras que la coloración se torna café oscuro o amarillenta.(Escudero Santiago., 2012)<sup>26</sup>

---

<sup>22</sup> Giraldo Op. cit, p 45.

<sup>23</sup> Escudero, Op. cit, p. 16

<sup>24</sup> Cerda, Op. cit, p 2-11

<sup>25</sup> *Ibíd.*, p. 2-11

<sup>26</sup> Escudero, Op. cit, p. 16

Tabla 1. Valores típicos de la composición de lixiviados procedentes de vertederos nuevos y maduros.

Parámetro	Unidad	Relleno Sanitario (R.S) nuevo < 2 años		R.S Maduro >10 años
		Rango	Típico	
DBO <sub>5</sub>	mg/L	2000 – 30000	10000	100 – 200
DQO	mg/L	3000 – 60000	18000	100 – 500
COT	mg/L	15000 – 20000	6000	80 – 160
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	200 – 2000	500	100 – 400
Nitrógeno Orgánico	mg/L	10 – 800	200	80 – 120
N-amoniacal	mg/L	10 – 800	200	20 – 40
Nitratos	mg/L	5 – 40	25	5 – 10
Fosforo Total	mg/L	5 - 100	30	5 – 10
Alcalinidad como Ca CO <sub>3</sub>	mg/L	1000 - 10000	3000	200 – 1000
Ph		4.5 – 7.5	6	6.6 – 7.5
Dureza Total como CaCO <sub>3</sub>	mg/L	300 – 10000	3500	200 – 500
Calcio	mg/L	200 – 3000	1000	100 – 400
Magnesio	mg/L	50 – 1500	250	50 – 200
Potasio	mg/L	200 – 1000	300	50 – 400
Sodio	mg/L	200 – 2500	500	100 – 200
Cloro	mg/L	200 – 3000	500	100 – 400
Sulfatos	mg/L	50 – 1000	300	20 – 50
Hierro Total	mg/L	50 - 1200	60	20 – 200

Fuente: (Tchobanoglous et al., 1998)

## 5.4 TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS

Las características del lixiviado varían según la edad del relleno sanitario por lo cual es importante conocer el tipo de lixiviado a tratar, lo cual permitirá elegir el tipo de tratamiento adecuado para lograr una eficiencia en la remoción de los contaminantes presentes en el mismo.

En los últimos años, se han desarrollado diferentes tecnologías para cumplir con los cada vez más estrictos límites de descarga establecidos en la legislación, entre los cuales se incluyen, tratamientos biológicos, físico-químicos y de oxidación avanzada.(Primo Martinez, 2008)<sup>27</sup>

Debido a su fiabilidad, simplicidad y buena relación coste-eficiencia, los tratamientos de tipo biológicos son los usualmente empleados para la remediación de lixiviados. Sin embargo, cuando se trabaja con lixiviados estabilizados (poco biodegradables), los procesos biológicos pueden no lograr alcanzar las reducciones necesarias de DQO debido al carácter recalcitrante de los compuestos orgánicos presentes en este tipo de efluentes. La actividad biológica también puede ser inhibida por algunos compuestos de carácter toxico. Por esta razón, la búsqueda de otras tecnología eficaces para el tratamiento de lixiviados de vertedero se ha intensificado en los últimos años. (Primo Martinez, 2008)<sup>28</sup>

Los tratamientos físico-químicos han demostrado su eficacia no solo para la remoción de las sustancias refractarias del lixiviado maduro, sino también como etapa final de afino tras un proceso biológico. Antes de su descarga, el efluente es sometido a un proceso físico-químico adicional como: precipitación, coagulación-floculación, adsorción con carbón activo, intercambio iónico o filtración con membranas. Los mayores inconvenientes de estas tecnologías son el encarecimiento de costes por el consumo de reactivos, los requerimientos energéticos y la transferencia de la contaminación de una fase a otra sin solucionar definitivamente el problema medioambiental. Algunos autores han revisado la aplicación de este conjunto de procesos al tratamiento de lixiviados de vertederos. (Primo Martinez, 2008)<sup>29</sup>

Los procesos de oxidación avanzada se presentan como una alternativa eficaz para la mineralización de los compuestos orgánicos recalcitrantes en los lixiviados por su elevada capacidad y velocidad de oxidación. Sin embargo, técnicas aplicadas a gran escala, generalmente, no son aceptables económicamente. La combinación de los POA's con tratamientos biológicos reduciría los costes considerablemente, pero la compatibilidad de los dos procesos debe ser probada. (Primo Martinez, 2008)<sup>30</sup>

---

<sup>27</sup> Primo Martínez, Oscar. Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertedero de RSU mediante procesos de oxidación avanzada. Tesis de doctorado. Cantabria: Universidad de Cantabria. Departamento de ingeniería química y química inorgánica. 2008. 137 p.

<sup>28</sup> Ibid., p. 137

<sup>29</sup> Ibid., p. 137

<sup>30</sup> Ibid., p. 137

5.4.1 Procesos biológicos. Los procesos biológicos son principalmente empleados en la remoción de materia orgánica, que como en el caso de los lixiviados es predominantemente materia orgánica disuelta, son los procesos biológicos de tratamiento (Giraldo, 2001)<sup>31</sup>. Los procesos biológicos son una buena alternativa cuando el relleno sanitario se encuentra en la etapa acidogénica, ya que son ricos en ácidos grasos volátiles los cuales se pueden degradar fácilmente mediante estos procesos.

Los procesos biológicos (aerobios y anaerobios) son especialmente eficientes en el tratamiento de lixiviados de rellenos jóvenes ( $DBO_5/DQO > 0.4$ ). (Cerde, 2007)<sup>32</sup>

5.4.1.1 Tratamiento Aerobio. Consiste en la degradación biológica de los componentes orgánicos presentes en el lixiviado en presencia de oxígeno. Durante esta degradación se forman sólidos decantables que se separan con facilidad de la fracción líquida. Estos sistemas requieren de ciertas condiciones estables de funcionamiento, carga orgánica, concentración de nutrientes, de pH, etc. (Escudero Santiago., 2012)<sup>33</sup>

Tabla 2. Sistemas de tratamiento Aerobio

<b>Sistema de Crecimiento Suspendido Aerobios</b>	Lodos Activados
	Lagunas Aerobias
	Reactores Biológicos secuenciales (SBR)
<b>Sistema de Crecimiento Adherido Aerobios</b>	Biodiscos
	Filtro Percolador
	Lechos fluidizados

5.4.1.2 Tratamiento Anaerobio. Consiste en la degradación biológica de compuestos orgánicos llevada a cabo en ausencia de oxígeno, este tratamiento no requiere alto consumo de energía y no genera tanto lodo comparado con los procesos aerobios.

Sin embargo, se deben tener muchas consideraciones en la operación, como por ejemplo, los altos contenidos de amoníaco y de minerales disueltos pueden generar problemas de toxicidad para los microorganismos, lo que hará necesario una remoción previa del

<sup>31</sup> Giraldo, Op. cit, p 47

<sup>32</sup> Cerde, Op. cit, 2-15

<sup>33</sup> Escudero, Op. cit 25



amoníaco o la aplicación de cargas de trabajo reducidas dado las limitaciones en la actividad microbiana por toxicidad. (Santiago, 2012)<sup>34</sup>

Otro problema que se ha detectado en la marcha es la acumulación de material inorgánico precipitado dentro de los reactores que termina por formar incrustaciones que limitan el volumen activo del reactor, limitan la actividad de los lodos y taponan los sistemas de conducciones de los reactores, acabando en un colapso del sistema de tratamiento.(Santiago, 2012)<sup>35</sup>

Tabla 3. Sistemas de tratamiento Anaerobio

<b>Sistema de Crecimiento Suspendido</b>	UASB
	Lagunas Anaerobias
	Reactores Biológicos secuenciales Anaerobios (ASBR)
<b>Sistema de Crecimiento Adherido</b>	Filtro Anaerobio
	Lechos fluidizados

Tabla 4. Resultados de los trabajos que comparan el tratamiento aerobio y anaerobio de lixiviados de vertederos de RSU.

Autores	Borzacconi et al., 1996			Álvarez et al., 2006	
Sistema Probado	Aerobio		Anaerobio	Aerobio	Anaerobio
	Reactor de lodos activados	Sistema de biodiscos (4 módulos c/12 discos)	Reactor UASB	Sistema de biodiscos (48 discos)	Reactor UASB
Capacidad	10L	≈10 L	11.8 l	60 L	39.1 L
DQO <sub>influyente</sub>	7.500-20.000 mg/L	7.500-20.000 mg/L	7.500-20.000 mg/L	7,650 - 28,250 mg/L	7,650 - 28,250 mg/L
DBO <sub>5</sub> influyente	3.400mg/L	3.400-16.800 mg/L	3.400-16.800 mg/L	5,250 - 20,890 mg/L	5,250 - 20,890 mg/L
pH <sub>influyente</sub>	7.4 – 8.7	7.4 – 8.7	7.4 – 8.7	6.5 – 8.3	6.5 – 8.3
Alcalinidad total (mgCaCO <sub>3</sub> /L	4,590 - 14,110 mg/L	4,590 - 14,110 mg/L	4,590 - 14,110 mg/L	2,750 - 9,500 mg/L	2,750 - 9,500 mg/L
N-amoniaco	525 - 1,835 mg/L	525 - 1,835 mg/L	525 - 1,835 mg/L	577.5 - 937 mg/L	577.5 - 937 mg/L

<sup>34</sup> Escudero, Op. cit, p. 26

<sup>35</sup> Ibid., p. 27

Otras Especificaciones	Posee una membrana removible que divide en dos secciones: una cámara de aireación y una cámara de sedimentación	Cada disco con diám. = de 29cm y espesor = 0.5cm Velocidad = 7 rpm	Se inoculó 1/3 del $V_{\text{reactor}}$ con lodo de tratamiento anaerobio de efluente de una fábrica de levadura	Cada disco con diám. = 30cm Velocidad = 5.5 rpm. El reactor se inoculó con lodo de digestor aerobio del Instituto Colombiano de Petróleo	Se inoculó 1/3 del $V_{\text{reactor}}$ con lodo de tratamiento anaerobio de efluente de una fábrica embotelladora
Carga Orgánica Optima Aplicada	-	18-20g DQO/m <sup>2</sup> *día	-	Se inoculó 1/3 del $V_{\text{reactor}}$ con lodo de tratamiento anaerobio de efluente de una fábrica embotelladora	-
Máximo % de remoción de DQO	75% (Promedio= 55%)	75% (Promedio= 55%)	80% (Promedio= 60%)	91.91% (Promedio= 75.88%)	65.45% (Promedio= 30%)

Fuente:(Escudero Santiago., 2012)

## 5.5 PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA

Los procesos de oxidación avanzada son métodos basados en la oxidación química o fotoquímica de los contaminantes orgánicos. Los POA's son procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de los contaminantes.(Aliaga Simorte, 2010)<sup>36</sup>

La oxidación química es un proceso de tratamiento avanzado que se utiliza para oxidar contaminantes a productos finales o intermediarios que son más fácilmente biodegradables o a productos que son más fácilmente removidos por otros procesos (precipitación, coagulación, sedimentación, filtración, adsorción). En los POA's, se usan el cloro (Cl), ozono (O<sub>3</sub>), peróxido de hidrogeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), permanganato de potasio (KMnO<sub>4</sub>) e hipoclorito de calcio como oxidantes. La oxidación química tiene la ventaja de que las sustancias son mineralizadas casi completamente (Cerde, 2007)<sup>37</sup>

Estos procesos involucran la generación y uso de especies transitorias poderosas, fundamentalmente el radical hidroxilo OH, una especie de gran poder oxidante

<sup>36</sup> Aliaga Simorte, Sonia. Aplicación del proceso Fenton y Coagulación-Floculación para la regeneración de aguas depuradas. Proyecto fin de carrera. Zaragoza: Escuela Universitaria de Ingeniería técnica industrial de Zaragoza, 2010. 19 p

<sup>37</sup> Cerde, Op. cit 2-17

debido a su potencial redox, sólo superado por el del flúor. El radical hidroxilo puede ser generado por medios fotoquímicos (incluida la luz solar), o por otras formas de energía, y posee alta efectividad para la oxidación de la materia orgánica.(Aliaga Simorte, 2010)<sup>38</sup>

El radical hidroxilo es poco selectivo, lo cual resulta conveniente si se desea tratar aguas con múltiples componentes. Estos radicales libres son capaces de convertir por degradación oxidativa los contaminantes presentes en los residuos industriales líquidos, en sustancias que son inocuas para el medio ambiente.(Muñoz Santibañez, 2011)<sup>39</sup>

Dependiendo de la naturaleza de las especies orgánicas son posibles dos tipos de ataque. En el primera lo materia orgánica mineraliza, es decir, se convierte en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, como ocurre con alcanos y alcoholes (Figura 1); en el segundo los radicales hidroxilo se adicionan al contaminante, como es el caso de olefinas y compuestos aromáticos. (Muñoz Santibañez, 2011)<sup>40</sup>

La versatilidad de los POA's radica en el hecho de existir varias alternativas para la generación de radicales Hidroxilo, como por ejemplo, la combinación de oxidantes como ozono y peróxido de hidrogeno (con UV), con catalizadores como iones metálicos o semiconductores.

Los POA's pueden usarse como una etapa previa al tratamiento biológico, para aumentar la biodegradabilidad de las aguas residuales, esto siempre y cuando se generen compuestos intermedios fácilmente degradables por el tratamiento biológico. (Muñoz Santibañez, 2011)<sup>41</sup>

---

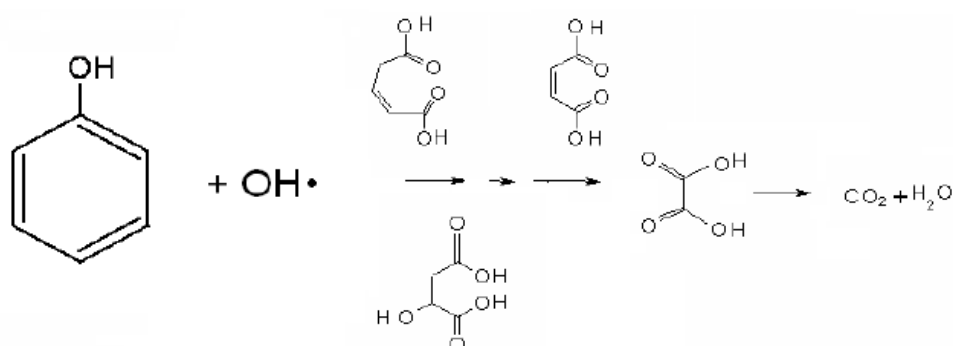
<sup>38</sup> Aliaga, Op. cit 19

<sup>39</sup> Muñoz Santibañez, Alejandro Enrique, Proceso Fenton y Foto-Fenton para la remoción de fenoles de efluentes generados en una planta de celulosa Kraft. Tesis de Magister en Ciencias. Viçosa: Universidad Federal de Viçosa. 2011. 7 p

<sup>40</sup> Ibid., p. 7

<sup>41</sup> Ibid., p. 8

Figura 1. Acción del radical hidroxilo sobre fenol



Fuente: (Muñoz Santibañez, 2011)

Algunos POA's, como la fotocatalisis heterogénea, la radiólisis y otras técnicas avanzadas, recurren a reductores químicos que permiten acelerar transformaciones en contaminantes tóxicos poco susceptibles a la oxidación, como los iones metálicos o los compuestos halogenados. (Aliaga Simorte, 2010)<sup>42</sup>

Tabla 5. Potenciales de oxidación de las distintas especies químicas

Especie	Potencial
Flúor	3.03
Radical Hidroxilo	2.80
Oxígeno Atómico	2.42
Ozono	2.07
Peróxido de hidrogeno	1.78
Radical perhidroxilo	1.70
Permanganato	1.68
Ácido hipocloroso	1.59
Dióxido de cloro	1.57
Ácido hipocloroso	1.49
Cloro	1.36
Bromo	1.09
yodo	0.54

Fuente: (Legrini et. al, 1993)

<sup>42</sup> Aliaga Simorte, Op. cit 19

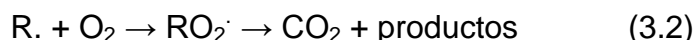
Los POA's se pueden usar solos o combinados entre sí o con métodos convencionales. Además producen la desinfección de las aguas tratadas por inactivación de bacterias y virus.

Hay una gran variedad de contaminantes que pueden ser degradados mediante estos procesos, aunque hay algunos refractarios a este tipo de tratamientos como el ácido oxálico o el acético.(Aliaga Simorte, 2010)<sup>43</sup>

5.5.1 Mecanismos de reacción. Los radicales hidroxilos actúan de manera no selectiva sobre los compuestos orgánicos y pueden hacerlo con tres tipos de ataque inicial:

- Abstracción de un átomo de hidrógeno por parte del radical hidroxilo, formando agua.
- Adición electrófila del radical a un doble enlace.
- Transferencia electrófila.

Estos radicales son los responsables de la oxidación de los compuestos orgánicos (RH) por captura de hidrógeno y formación de un radical orgánico (3.1), que puede reaccionar con el oxígeno atmosférico formando peroxirradicales (3.2) que dan lugar a una serie de reacciones de degradación oxidativa, alcanzando en algunos casos la mineralización completa de la materia orgánica.



Los radicales hidroxilos pueden actuar frente a los compuestos orgánicos mediante otros mecanismos de reacción, como la adición electrofílica (3.3) o la transferencia de electrones (3.4).



También se pueden producir recombinaciones entre radicales hidroxilo para formar peróxido de hidrógeno (3.5), o se pueden formar radicales perhidroxilo en presencia de exceso de peróxido de hidrógeno (3.6).




---

<sup>43</sup> Aliaga Simorte, Op. cit 19

El ataque de tipo 1 de los mencionados arriba es típico de alcanos y alcoholes mientras que el de tipo 2 se da para olefinas y aromáticos. Dentro de los aromáticos los que presentan grupos activantes reaccionan más rápido que los que presentan grupos desactivantes y los monosustituídos lo hacen con mayor rapidez que los polisustituídos.

La formación de intermedios durante la degradación es un aspecto que depende de muchos factores: el número de radicales hidroxilo y la presencia de otros radicales, la cantidad de agentes secuestradores de radicales, la concentración de contaminante y de iones hierro Fe (II) o Fe (III), etc. (Aliaga Simorte, 2010)<sup>44</sup>

5.5.2 Características de lo POA's. Los POA's presentan ciertas tecnologías que los definen como tecnologías prometedoras de cara al tratamiento de aguas:

- Son métodos muy efectivos en la destrucción de bajas concentraciones de compuestos aromáticos.
- Son capaces de conseguir la conversión a CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e iones inorgánicos, mostrando una reactividad del agente oxidante no selectivo que minimiza la acumulación de intermedios de degradación tóxica, procedentes de los contaminantes originales, que sí pueden originarse mediante otros métodos que no consiguen la oxidación hasta sus últimas consecuencias.
- Presentan buena eficiencia en la destrucción de contaminantes.
- Generalmente se consigue la destrucción completa del contaminante. En cambio, en las tecnologías convencionales, que no emplean especies fuertemente oxidantes, no alcanzan a oxidar completamente la materia orgánica.
- Usualmente no generan barros que a su vez requieren de un proceso de tratamiento.
- Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente biológico.
- Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración (ppb).

---

<sup>44</sup> Aliaga Simorte, Op. cit 21

- No se forman subproductos de reacción, o se forman en baja concentración.
- Son ideales para disminuir la concentración de compuestos formados por pretratamientos alternativos, como la desinfección.
- Generalmente mejoran las propiedades organolépticas del agua tratada.
- En muchos casos, consumen mucha menos energía que otros métodos.
- Permiten transformar contaminantes refractarios en productos tratables luego por métodos más económicos como tratamiento biológico.
- Eliminan efectos sobre la salud de desinfectantes y oxidantes residuales como el cloro.
- Su principal inconveniente es su elevado coste por el uso de reactivos caros y/o elevado consumo energético. No se debe utilizar como alternativa a otros tratamientos más económicos como la degradación. Su máximo potencial se explota cuando se consigue integrar con otros tratamientos a fin de conseguir la máxima economía de oxidante.
- Su utilización como etapa de pretratamiento para el aumento de la biodegradabilidad de las aguas residuales que contienen compuestos recalcitrantes y tóxicos, puede ser justificada si los productos intermedios resultantes son fácilmente degradados por microorganismos en un tratamiento biológico. La combinación de un POA's con un tratamiento biológico resulta muy prometedora desde el punto de vista económico.

5.5.3 Clasificación de los POA's. En función de la forma de generación de las especies oxidantes, los POA's se pueden dividir en procesos No-fotoquímicos y fotoquímicos, diferenciándose entre ellos en que los primeros originan las especies reactivas mediante la transformación de especies químicas o utilizando diversas formas de energía, con excepción de la irradiación luminosa; mientras que los procesos fotoquímicos generan las especies en cuestión mediante luz natural o artificial.(Domènech X., 2001)<sup>45</sup>

---

<sup>45</sup> Domènech Op. cit. P3-25

Tabla 6. Clasificación de los POA's

Procesos no fotoquímicos	Procesos fotoquímicos
Oxidación en medio alcalino( $O_3/HO^-$ )	Oxidación en agua sub/ y supercrítica
Ozonización con peróxido de hidrógeno ( $O_3/H_2O_2$ )	Procesos fotoquímicos
Procesos Fenton ( $Fe^{2+}/H_2O_2$ ) y relacionados	Fotólisis del agua en el ultravioleta de vacío (UVV)
Oxidación electroquímica	UV/ $H_2O_2$
Radiólisis y tratamiento con haces de electrones	UV/ $O_3$
Plasma no térmico	Foto-Fenton y relacionadas
Descarga electrohidráulica-Ultrasonido	Fotocatálisis heterogénea

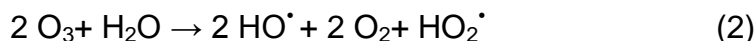
Fuente: (Escudero Santiago., 2012)

5.5.3.1 Ozonación. El ozono ( $O_3$ ) y el oxígeno son oxidantes muy poderosos, los cuales pueden oxidar muchos contaminantes presentes en corrientes de agua residuales y biosólidos. El  $O_3$  es más activo que el oxígeno, pero debe ser generado en el momento de utilizarse ya que es un material inestable. Desde 1980, el  $O_3$  ha sido usado para el tratamiento de agua residual urbana, industrial y para tratar lodos de proceso a gran escala. También se ha aplicado en la desinfección de agua para beber, generalmente para remover cianuros y fenoles, aunque también ha permitido un notable mejoramiento del gusto, color, características de filtración y biodegradabilidad de la misma. La purificación y desinfección oxidativa con ozono como tratamiento terciario de agua residual le confieren muchas ventajas tales como la reducción de DBO y DQO, disminución de olor, color y turbiedad, destrucción de organismos patógenos, el efluente presenta alta concentración de oxígeno disuelto, entre otras. Algunas desventajas que presenta esta tecnología es que los costos de generación de  $O_3$  son relativamente altos, por lo que requieren de altas eficiencias de utilización de la molécula; existen problemas de transferencia de masa asociados a gases, al no poseer solubilidad infinita en agua de la molécula de  $O_3$ .(Escudero Santiago., 2012)<sup>46</sup>

<sup>46</sup> Escudero. Op. cit 31



El ozono puede reaccionar en forma directa con un sustrato orgánico a través de una reacción lenta y selectiva, o en forma indirecta con las especies formadas cuando el ozono es descompuesto en agua, por lo que se suscitan reacciones radicalarias favorecidas en medio alcalino



La primera reacción es de importancia en medios ácidos y para solutos que reaccionan muy rápido con el  $O_3$ , como los compuestos orgánicos no saturados, con grupos cromofóricos o grupos aminos. La segunda reacción puede iniciarse de distintos modos, con especies tales como  $HO^\bullet$ ,  $HO^{2-}$ ,  $HCOO^-Fe^{2+}$  o sustancias húmicas. Por tanto, la ozonación u ozonización es sensiblemente más eficiente en medios alcalinos.

La ozonación también se ha aplicado en la decoloración de caolín y pulpa de celulosa, en el tratamiento de efluentes acuosos extremadamente contaminados. (Escudero Santiago., 2012)<sup>47</sup>

- 5.5.3.2  $O_3/H_2O_2$ . Se logra una mejoría del proceso de ozonación agregando peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), que es un ácido débil, un poderoso oxidante y un compuesto inestable. El uso de dos o más oxidantes combinados permite aprovechar los posibles efectos sinérgicos entre ellos, lo que produce una destrucción adicional de la carga orgánica. Entre las posibles mezclas de agentes oxidantes, la de  $O_3/H_2O_2$  es una de las más usadas. El  $H_2O_2$  puede iniciar la descomposición de  $O_3$  por transferencia de electrones. La reacción genera  $HO^\bullet$  consumiendo  $H_2O_2$  y  $O_3$ , a través de un mecanismo en cadena. (Escudero Santiago., 2012)<sup>48</sup>

Se sabe que este proceso combinado es caro pero rápido, además se pueden tratar contaminantes organoclorados, como tricloroetileno, tetracloroetileno, plaguicidas, etc. Se ha aplicado en la decoloración de compuestos de agua residual de la industria papelera, así como en el tratamiento de lixiviados de vertederos de RSU. Tal es el caso del trabajo de Cortez et al., (2010), que pusieron en marcha un sistema tratamiento de lixiviado escala laboratorio vía ozonación con  $H_2O_2$  y con ajuste de pH, utilizando un reactor de tipo semi-batch de 3.5 L aproximadamente. Ellos encontraron que combinando  $O_3/H_2O_2$  y manteniendo un pH de 7 se obtienen mejores resultados de remoción de DQO y COT. La dosis óptima de  $H_2O_2$  usando este proceso combinado

<sup>47</sup> Escudero. Op. cit 31

<sup>48</sup> *Ibíd.*, p. 32

fue de 600 mg/L, que condujo a la remoción del 63% de DQO y 53% de COT, además contribuyó a la remoción de materia orgánica recalcitrante. Sin embargo, se presentó un incremento en la DBO incluso por arriba del 150% al final del tratamiento, lo cual se asocia con la transformación de grandes compuestos refractarios a productos más pequeños y biodegradables. Esto último permitirá aplicar la sinergia  $O_3/H_2O_2$  como pre-tratamiento biológico a este tipo de matriz contaminante.

- 5.5.3.3 UV/ $H_2O_2$ . La irradiación de la molécula de  $H_2O_2$  por fotones de energía superior a la de la unión O-O<sup>1</sup> tiene un rendimiento cuántico de 0.98 (a 254 nm), que conduce a la producción de dos radicales HO• por cada molécula de  $H_2O_2$ :



La fotólisis del  $H_2O_2$  se realiza casi siempre utilizando lámparas de vapor de mercurio de baja o media presión de 254 nm, pero como la absorción del  $H_2O_2$  es máxima a 220 nm, sería más conveniente el uso de lámparas de Xe/Hg que emiten en el rango de 210-240 nm, aunque éstas suelen ser más costosas. El proceso fotoquímico es más eficiente en medio alcalino, ya que la base conjugada del peróxido ( $HO_2^-$ ) tiene una absorptividad mayor ( $\epsilon_{254} = 240 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ). (Escudero Santiago., 2012)<sup>49</sup>

Tabla 7. Ventajas y Desventajas de la combinación de UV/ $H_2O_2$ .

<b>Ventajas</b>	El oxidante es accesible comercialmente
	Es térmicamente estable
	Puede almacenarse en el lugar donde se utilizara
<b>Desventajas</b>	Se necesitan altas concentraciones del oxidante, dada la baja sección eficaz de absorción de $H_2O_2$ a 254 nm.
	El método no es efectivo para degradar alcanos fluorados o clorados, que no son atacados por HO•.
	Tiene baja eficiencia para tratar agua contaminada de alta absorbancia a $\lambda < 300 \text{ nm}$ .
	Un exceso de $H_2O_2$ en presencia de altas concentraciones de HO• se pueden desencadenar reacciones competitivas que producen un efecto inhibitorio para la degradación

Fuente: (Domènech et. al, 2001)

<sup>49</sup> Escudero. Op. cit 33

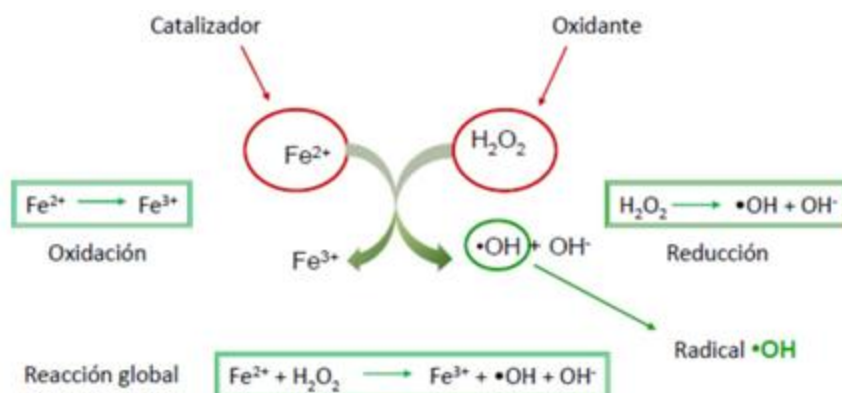
Este POA se ha aplicado al tratamiento de contaminantes presentes en efluentes industriales y municipales, tales como organoclorados, alifáticos, aromáticos, fenoles, plaguicidas, colorantes, etc. (Escudero Santiago., 2012)<sup>50</sup>

## 5.6 PROCESO FENTON Y FOTO-FENTON

Los POA's cuya aplicación se ha extendida en los últimos años para el tratamiento de una gran variedad de efluentes contaminados, son los procesos Fenton y Foto-Fenton. El proceso Fenton se realiza en ausencia de luz, mientras el proceso de Foto-Fenton se lleva a cabo en presencia de irradiación de luz solar o una fuente de luz artificial. (Escudero Santiago., 2012)<sup>51</sup>

5.6.1 Principio del Proceso Fenton. El peróxido de hidrogeno ( $H_2O_2$ ) es un reactivo químico seguro, abundante y de sencillo manejo, ampliamente usado para la prevención de los contaminantes. Sin embargo, por si mismo no posee significativas propiedades oxidantes, por lo que hace necesaria su con otras sustancias o catalizadores para incrementar su eficiencia.(Primo Martinez, 2008)<sup>52</sup>

Figura 2. Proceso Fenton



El proceso Fenton es la tecnología que se desarrolla a partir de la aplicación de  $H_2O_2$  en combinación con una sal de hierro (II). En 1881, Henry J. H.

<sup>50</sup> Escudero. Op. cit 33

<sup>51</sup> Ibíd., p. 34

<sup>52</sup> Primo. Op. cit 140

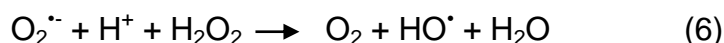
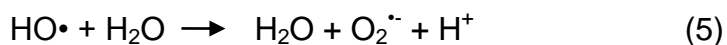
Fenton publico una breve descripción de las fuertes propiedades de oxidación de una mezcla de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y sales de hierro. Esta mezcla llego a ser conocida como Reactivo Fenton, en honor a su descubridor (tang 2004). En los siguientes años (1894), se conoció que inicialmente el científico aplico esta reacción para la oxidación de ácidos orgánicos como el fórmico, glicólico, láctico, tartárico, málico, benzoico, entre otros compuestos. Lo que encontró fue que en ausencia de sales de hierro la degradación con  $\text{H}_2\text{O}_2$  procedía a muy bajas velocidades, incluso a veces, no se llevaba a cabo oxidación de los ácidos orgánicos. (Escudero Santiago., 2012)<sup>53</sup>

En 1990, Cross y sus colaboradores, confirmaron que las sales de hierro mejoraban significativamente las cinéticas de descomposición con  $\text{H}_2\text{O}_2$ ; más tarde, Goldhammeri investigo el efecto del reactivo Fenton sobre fenoles y encontró que para cada equivalente de  $\text{Fe}^{2+}$  se descomponían tres equivalentes de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , mientras que para soluciones concentradas de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , por cada mol de  $\text{Fe}^{2+}$  se descomponían 24 equivalentes de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . (Escudero Santiago., 2012)<sup>54</sup>

No fue sino hasta 1934, cuando Haber y Weiss propusieron por primera vez que existían radicales libres ( $\text{HO}^\bullet$ ) debido a la reacción:



Además, éstos investigadores describieron que el  $\text{HO}^\bullet$  en presencia de  $\text{H}_2\text{O}_2$  forma el anión superóxido  $\text{O}_2^{\bullet-}$  y que este último ante un exceso de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , da lugar a la generación de una cantidad adicional de radical hidroxilo, según las siguientes reacciones:



El proceso Fenton ha resultado efectivo para degradar compuestos alifáticos y aromáticos clorados, PCBs, nitroaromáticos, colorantes azo, clorobenceno, PCP, fenoles, fenoles clorados, etc.

Son muy pocos los compuestos que no pueden ser atacados por este reactivo, entre ellos la acetona, el ácido acético, el ácido oxálico, las parafinas y los compuestos organoclorados. Es un buen oxidante de herbicidas y otros contaminantes de suelos, tales como hexadecano o Dieldrin. Puede

---

<sup>53</sup> Escudero. Op. cit 34

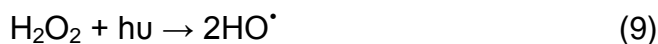
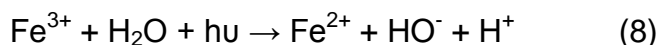
<sup>54</sup> Ibíd., p. 34

decolorar agua residual con distintos tipos de colorantes y otros residuos industriales, reduciendo su DQO. (Escudero Santiago., 2012)<sup>55</sup>

También se ha aplicado exitosamente el reactivo de Fenton en la reducción de DQO de agua residual municipal y subterránea y en el tratamiento de lixiviados, además es útil como pre-tratamiento de compuestos no biodegradables (Escudero Santiago., 2012)<sup>56</sup>

- 5.6.2 Principio del proceso Foto-Fenton. El proceso Foto-Fenton tiene lugar en presencia de luz ultravioleta (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup>), que es la principal diferencia que tiene con el proceso Fenton (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/Fe<sup>2+</sup>). En presencia de radiación ultravioleta, se observa un aumento de la velocidad de oxidación de compuestos orgánicos mediante el proceso Fenton. Bajo estas condiciones, la fotólisis de los complejos Fe<sup>3+</sup> permite una mayor regeneración del Fe<sup>2+</sup>. Además se genera otra vía para la generación del radical HO<sup>•</sup>, a partir de la fotólisis del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.(Escudero Santiago., 2012)<sup>57</sup>.

De manera general, en este proceso se llevan a cabo las siguientes reacciones (Bacardit et al., 2009):



En forma esquemática, (Figura 3) se presenta una ruta de reacción propuesta por Kim et al., (1998) para el proceso Foto-Fenton, comenzando por la foto-reducción primaria de complejos de Fe<sup>3+</sup> disueltos a iones Fe<sup>2+</sup>, seguida de la reacción Fenton y la oxidación de compuestos orgánicos. La fotólisis de complejos de Fe<sup>3+</sup> toma lugar bajo irradiación con luz UV cercano, incluso con luz visible. Los iones de Fe<sup>2+</sup> formados por la foto-reducción de complejos de Fe<sup>3+</sup> proveen en presencia de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de radicales hidroxilos en el paso secundario.(Escudero Santiago., 2012)<sup>58</sup>

---

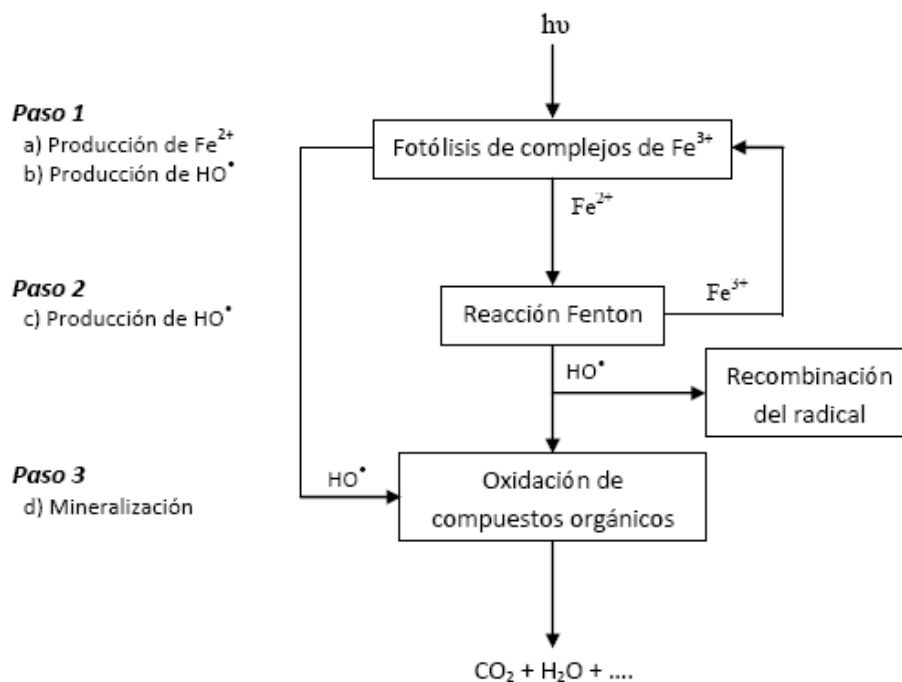
<sup>55</sup>Escudero. Op. cit 35

<sup>56</sup> Ibid., p. 35

<sup>57</sup> Ibid., p. 36

<sup>58</sup> Ibid., p. 37

Figura 3. Rutas de reacción del proceso Foto Fenton



Fuente: (modificado de Kim et. al., 1998)

Los radicales  $\text{HO}^\bullet$  formados en el proceso Foto-Fenton son altamente reactivos e inician la destrucción oxidativa de sustancias orgánicas en agua, que puede conducir incluso a la mineralización total de contaminantes orgánicos.

Como ya se mencionó, estas reacciones tienen lugar desde longitudes de onda que van desde los 300 nm hasta la región visible. Por lo tanto, este proceso podría ser llevado a cabo bajo radiación solar permitiendo una reducción del costo de operación. En este contexto, se han llevado a cabo tratamientos vía Foto-Fenton utilizando como fuente de radiación la luz solar, como lo reportaron Conrado et al., (2010), quienes trataron una muestra residual de formaldehído proveniente de un laboratorio biológico. Ellos encontraron que la remoción del analito con Foto-Fenton/luz solar fue de hasta 89%, en comparación con 88% de remoción usando luz artificial. Para esta prueba hallaron como dosis óptima de ferroxalato de potasio (fuente de  $\text{Fe}^{2+}$ ) 0.5 mmol/L y de  $\text{H}_2\text{O}_2$  1 mol/L.

Otra ventaja de esta tecnología es que la concentración del hierro (II) puede ser menor que la empleada en el proceso Fenton, reduciendo de esta manera el costo asociado al tratamiento (Escudero Santiago., 2012)<sup>59</sup>.

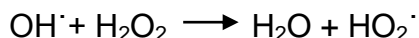
<sup>59</sup> Escudero. Op. cit 38

## 5.7 PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL PROCESO

Las condiciones de operación en las que se lleva a cabo el proceso, así como la composición del agua a tratar afectan sustancialmente a la velocidad y eficacia del proceso de oxidación. Se deben tener en cuenta algunos parámetros que influyen en la eficiencia del proceso.

5.7.1 pH. El sistema Fenton depende del pH del medio de reacción. La velocidad de las reacciones tiende a ser máxima en un pH cercano a 2,8 (Pignatello et al. 2006, Neyens et al. 2003). El valor óptimo se encuentra entre 2,5 y 2,8, donde el Fe (III) existe en disolución mayoritariamente como  $\text{Fe}(\text{OH})_2 \cdot 5(\text{H}_2\text{O})$ . A pH altos, la velocidad disminuye debido a la precipitación de hierro en forma  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . (Aliaga Simorte, 2010)<sup>60</sup>

5.7.2 Influencia de la concentración inicial de Peróxido de Hidrógeno. La velocidad de degradación aumenta con la cantidad de peróxido de hidrógeno, debido a la mayor producción de radicales hidroxilo. No obstante, a partir de una determinada cantidad de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , la velocidad de la reacción puede verse negativamente afectada, debido posiblemente a la auto-descomposición del  $\text{H}_2\text{O}_2$  en oxígeno y agua, por recombinación con radicales hidroxilo.



La concentración de Peróxido de Hidrogeno óptima depende de la naturaleza y concentración del compuesto a tratar y de la concentración de hierro. (Pey Clemente)<sup>61</sup>.

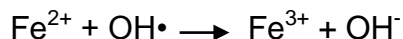
5.7.3 Efecto de la concentración de sal de hierro. Igual que en el caso del Peróxido de Hidrógeno, la velocidad de degradación aumenta con la cantidad de sal empleada, pero a partir de una determinada concentración de hierro disminuye la eficiencia de la reacción. Esto puede deberse al aumento de la turbidez de la disolución, que dificulta la absorción de luz necesaria para la realización del proceso Foto-Fenton, o a la reacción del  $\text{Fe}^{2+}$  con radicales hidroxilo. (Pey Clemente)<sup>62</sup>

---

<sup>60</sup> Aliaga Simorte, Op. cit 27

<sup>61</sup> Pey Clemente Jaime, Aplicación de procesos de oxidación avanzada (fotocatálisis solar) para tratamiento y reutilización de efluentes textiles. Tesis. Valencia. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Textil y Papelera.

<sup>62</sup> Ibid., p. 54



- 5.7.4 Temperatura. La reacción Fenton es endotérmica. La velocidad de oxidación incrementa con el incremento de la temperatura (Zhang et. al, 2005). A presión atmosférica el rango recomendable de operación es de 25-45 °C, ya que a temperaturas superiores a 45 °C se produce una descomposición del Peróxido de Hidrógeno en oxígeno y agua (Torrades et al, 2008), y la precipitación del hierro en forma de hidróxido debido a que su constante de solubilidad disminuye. Operando a presiones de hasta 3 atmósferas se pueden alcanzar temperaturas de 100 °C sin riesgo de que el Peróxido de Hidrógeno se descomponga.(Aliaga Simorte, 2010)<sup>63</sup>
- 5.7.5 Concentración de aniones inorgánicos. Algunos aniones inorgánicos actúan como inhibidores de la acción de los radicales  $\cdot\text{HO}$  o forman especies no reactivas con el hierro. Un ejemplo son los sulfatos y los fluoruros que reducen la reactividad del Fe (III) mediante mecanismos de coordinación y uniéndose a radicales hidroxilo; los nitratos, percloratos e hidrogenofosfatos forman complejos insolubles con el Fe (III).(Aliaga Simorte, 2010)<sup>64</sup>
- 5.7.6 Intensidad de luz. En el proceso Foto-Fenton la irradiación UV es usada para mejorar la reducción de  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$ , que ocurre por fotodescarboxilación de carboxilatos de hierro produciendo radicales  $\text{HO}^{\bullet}$  adicionales, así como para propiciar la fotólisis directa de  $\text{H}_2\text{O}_2$  hacia radicales  $\text{OH}^{\bullet}$ (Escudero Santiago., 2012)<sup>65</sup>.

---

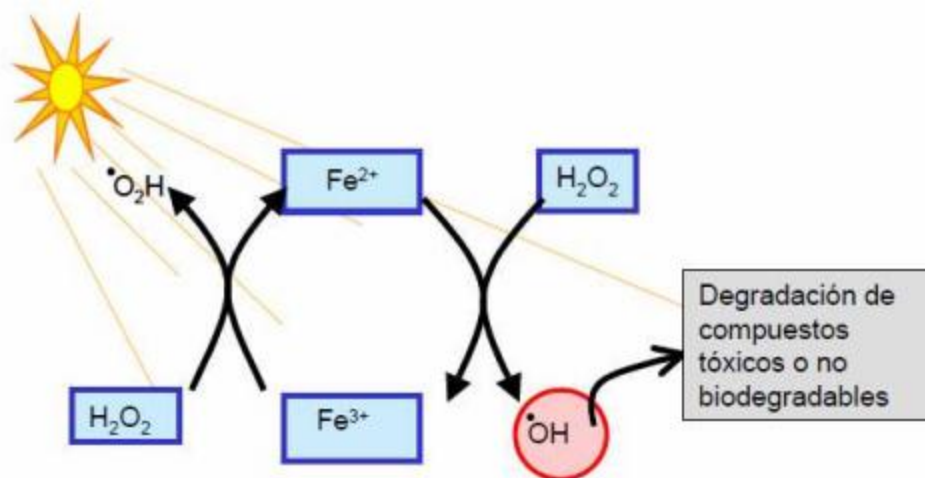
<sup>63</sup> Aliaga Simorte, Op. cit 27

<sup>64</sup> *Ibíd.*, p. 28

<sup>65</sup> Escudero. Op. cit 44



Figura 4. Mecanismo de reacción Foto Fenton en la generación de radicales hidroxilo



Existen trabajos donde se han estudiado el efecto de la irradiación UV sobre el tratamiento Fenton de lixiviados, como el realizado por Deng *et al.*, (2006), quienes trabajaron con una corriente de lixiviado maduro. Lo que encontraron fue que al aplicar una energía específica inicial de 80 kW/m<sup>3</sup> se conducía a la remoción del 51% de COT, que corresponde a 3 veces la eficiencia de remoción obtenida con el proceso a la oscuridad. Con una energía inicial aplicada de 160 kW/m<sup>3</sup> se estaría promoviendo una reducción todavía más alta de COT. La reducción de COT fue descrita por medio de una cinética de pseudo-primer orden. Las constantes de velocidad de reacción encontradas en este trabajo variando las irradiancias se presentan en la Tabla 8.(Escudero Santiago., 2012)<sup>66</sup>

<sup>66</sup> Escudero. Op. cit 45

Tabla 8. Constantes de velocidad de reacción a diferentes irradiaciones espectrales

Irradiancia espectral ( $E_v$ ), kW m <sup>-3</sup>	Constantes de velocidad (k), min <sup>-1</sup>
0	1.7
80	9.6
160	18.7

Fuente: (Escudero Santiago., 2012)

## 5.8 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO

El proceso Fenton está considerado como un tratamiento muy prometedor para la regeneración de aguas residuales. En la tabla 9 se muestran las principales ventajas y desventajas de este proceso:

Tabla 9. Ventajas y Desventajas del proceso Fenton

Ventajas	Desventajas
El Fe (II) es muy abundante, no es tóxico y es muy seguro.	Cuando el proceso finaliza es necesaria una etapa de neutralización para separar el hierro, generando un lodo que se ha de gestionar adecuadamente.
El peróxido de hidrógeno es fácil de manejar y ambientalmente benigno.	El peróxido de hidrógeno es un compuesto bastante más caro que el Fe (II) y es el principal causante del coste final del tratamiento.
No se forman compuestos clorados nocivos como en otras técnicas oxidativas.	El proceso Fenton no es capaz de lograr una mineralización completa de todos los contaminantes orgánicos, pero sí un incremento de la biodegradabilidad.
No existen limitaciones de transferencia de masa por tratarse de un sistema homogéneo.	El proceso requiere un estricto control del pH.
El diseño de reactores para la aplicación tecnológica es bastante sencillo.	

Fuente: [García-Montaña 2007, Pignatello et al. 2006, Parag et al. 2004, Neyens et al. 2003]

Una limitación importante, que se puede ver en la tabla, es que todos los reactantes, incluido el catalizador, se encuentran en disolución y la recuperación del hierro es costosa requiriendo pasos adicionales de separación, lo que incrementa los costes del tratamiento (Aliaga Simorte, 2010)<sup>67</sup>

## 5.9 FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA

Las exigencias medioambientales, cada vez más rigurosas, junto con la búsqueda de nuevos procedimientos más versátiles y económicos hacen de la Fotocatálisis Heterogénea una de las alternativas de mayor potencial como complemento o sustitución a las técnicas de tratamiento de aguas ya existentes. Los puntos fuertes de esta tecnología residen en su carencia de selectividad, actuando de forma indiscriminada sobre muy diversos tipos de contaminantes (orgánicos o inorgánicos), incluso sobre aquellos refractarios a otros tratamientos, así como en la posibilidad de utilizar la luz solar como recurso energético para la activación de las reacciones de degradación. Este último factor supondría una fuerte reducción de los costes de operación frente a otros tipos de tratamientos y la convertiría en una tecnología sostenible. (Pizarro de Oro, 2005)<sup>68</sup>

La fotocatálisis, consiste en una reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un catalizador o sustrato. Si éste es un semiconductor de banda ancha sensible a la luz, sobre el cual se originan fotorreacciones simultáneas de oxidación y reducción en diferentes zonas de la región interfacial (líquido-sólido o gas-sólido), se denomina a la tecnología fotocatálisis heterogénea (Claudia Marcela Rubiano H., 2005)<sup>69</sup>

La etapa inicial del proceso consiste en la generación de pares electrón-hueco ( $e^-$ - $h^+$ ) en las partículas de semiconductor. Cuando un fotón con una energía  $h\nu$  que iguale o supere la energía del salto de banda del semiconductor,  $E_g$ , incide sobre éste, se promueve un  $e^-$  de la banda de valencia (BV) hacia la banda de conducción (BC), generándose un  $h^+$  en la primera. Los electrones que llegan a la banda de conducción pueden desplazarse dentro de la red del semiconductor, asimismo se desplazan los huecos fotogenerados.

La excitación puede ser directa o indirecta según la absorción se produzca sobre el catalizador o sobre las moléculas de algún compuesto depositado en la

---

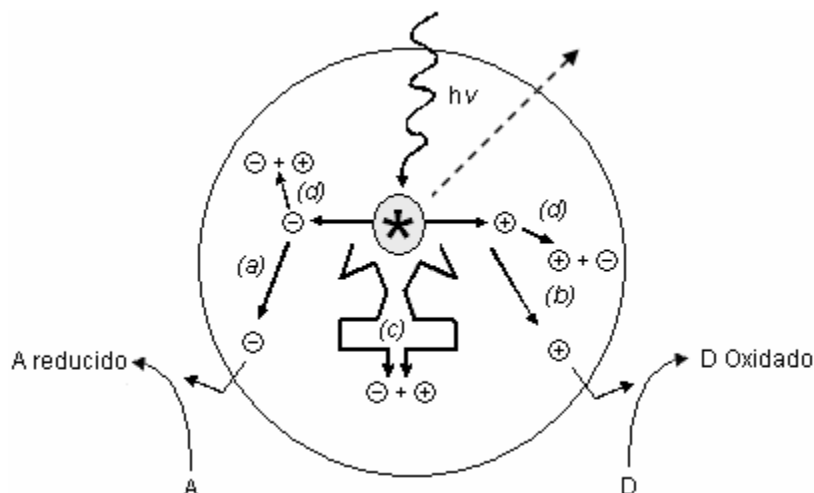
<sup>67</sup> Aliaga Simorte, Op. cit 29

<sup>68</sup> Pizarro de Oro, Patricia. Desarrollo de materiales basados en  $TiO_2$  mesoestructurado con aplicaciones fotocatalíticas. Tesis Doctoral. Madrid: Universidad Rey Juan Carlos. Departamento de Tecnología Química y Ambiental. 2005. 16 p.

<sup>69</sup> Claudia Marcela Rubiano H., William Alejandro Laguna C., Carmen Elena Zapata S., Juan Miguel Marín S. Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatálisis heterogénea a los procesos de remoción de fenoles en medio acuoso. En: Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Sistema de Información Científica. 2005.vol. 8, no 1, p 106

superficie de éste, siendo el primer caso el más general y de mayor aplicabilidad, cuyo mecanismo se describe en la Figura 5. (Claudia Marcela Rubiano H., 2005)<sup>70</sup>

Figura 5. Procesos que ocurren en la interfaz semiconductor- electrolito bajo iluminación



Fuente: (Claudia Marcela Rubiano H., 2005)

5.9.1 Principios de la fotocatalisis heterogénea. De manera general, la Fotocatalisis Heterogénea puede definirse como la aceleración de una reacción química por actuación de un catalizador sólido, activado mediante excitación electrónica al incidir sobre él radiación luminosa de un determinado contenido energético. La principal diferencia respecto de las técnicas catalíticas convencionales es, por tanto, que en estas últimas la activación tiene lugar por vía térmica, lo que en muchos casos supone un coste operacional mucho más elevado. (Pizarro de Oro, 2005)<sup>71</sup>

El haz luminoso puede interactuar directa o indirectamente con el catalizador, distinguiéndose de este modo dos variantes en el proceso de activación de las reacciones:

- Reacción fotosensibilizada. La energía radiante es absorbida por una especie química ligada al catalizador y tras ser excitada, le comunica dicho estado al catalizador por transferencia de cargas (electrones) o energía.

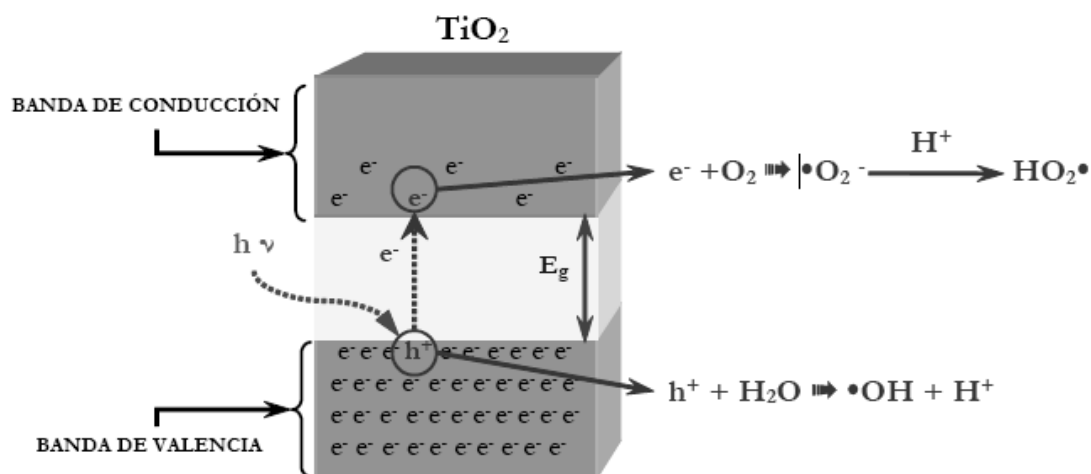
<sup>70</sup> Claudia Marcela Rubiano H. Op. cit 107

<sup>71</sup> Pizarro de Oro. Op. cit 17

- Reacción fotocatalizada. La luz excita directamente al catalizador siendo éste el que transfiere la carga o energía a otras especies adsorbidas en su superficie.

En la Figura 6, se muestra un esquema simplificado de las etapas de excitación por transferencia de cargas al emplear un material semiconductor, por ejemplo el  $\text{TiO}_2$ , como fotocatalizador. Cuando sobre estos materiales incide un fotón con energía igual o superior a la separación energética entre las bandas de valencia y de conducción (“band-gap” o EG), se produce la promoción de uno de los electrones a la banda de conducción y se genera un hueco ( $h^+$ ) en la banda de valencia. Esta separación de cargas induce un potencial redox en el material ya que los huecos tienen capacidad oxidante, mientras que los electrones pueden tomar parte en reacciones de reducción. (Pizarro de Oro, 2005)<sup>72</sup>

Figura 6. Activación de una partícula semiconductor en un proceso fotocatalítico



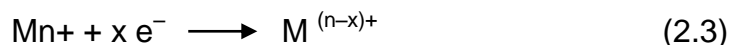
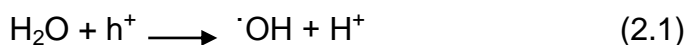
Fuente: (Pizarro de Oro, 2005)

En materiales conductores, como es el caso de los metales, estos pares  $e^-$ - $h^+$  se recombinan inmediatamente. Sin embargo, en los semiconductores el tiempo de vida medio de estas entidades es del orden de nanosegundos, de manera que una fracción de los mismos se difunde hasta la superficie de la partícula del fotocatalizador participando en reacciones redox (Figura 7., ruta I). Los huecos llevarán a cabo la oxidación de las moléculas adsorbidas

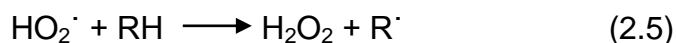
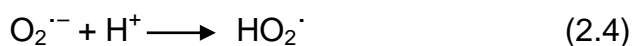
<sup>72</sup> Pizarro de Oro. Op. cit 18

en la superficie del sólido. Por otro lado, los electrones alojados en la banda de conducción podrán reducir a las moléculas aceptoras apropiadas.

Frecuentemente las especies donantes de electrones son los grupos hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), adsorbidos en la superficie del semiconductor, como tales entidades o en la forma de  $\text{H}_2\text{O}$ , generando radicales  $\cdot\text{OH}$  (reacción 2.1). La especie aceptora de electrones más habitual es el  $\cdot\text{O}_2$  que, por reducción, se transforma en el radical superóxido  $\cdot\text{O}_2^-$  (reacción 2.2). En el caso de existir especies metálicas iónicas, éstas incluso pueden precipitar como metales nobles (reacción 2.3), lo que abre un nuevo campo de aplicaciones de la fotocatalisis en la recuperación de metales de efluentes procedentes de actividades como la minería, el metalizado de superficies, la hidrometalurgia o la fotografía (Pizarro de Oro, 2005)<sup>73</sup>



Mediante procesos de recombinación química pueden formarse, a su vez, especies oxidantes de similar o mayor vida media, como es el caso del radical hidroperóxido y del Peróxido de Hidrógeno, cuya ruta general puede representarse por las reacciones (2.4) y (2.5).



Existen otras rutas, de carácter competitivo, por las que los electrones y huecos se recombinan y retornan a su estado fundamental. La recombinación del par de cargas viene acompañada de una liberación de energía en forma de calor o de radiación con longitud de onda igual o inferior a la original incidente (reacción 2.6). Este fenómeno supone un descenso de la eficiencia del fotocatalizador pudiendo ocurrir tanto dentro del volumen del semiconductor (Figura 7., ruta II) como en su superficie (Figura 7., ruta III).(Pizarro de Oro, 2005)<sup>74</sup>

<sup>73</sup> Pizarro de Oro. Op. cit 18

<sup>74</sup> Ibid., p. 19

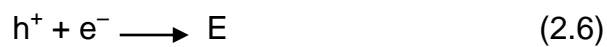
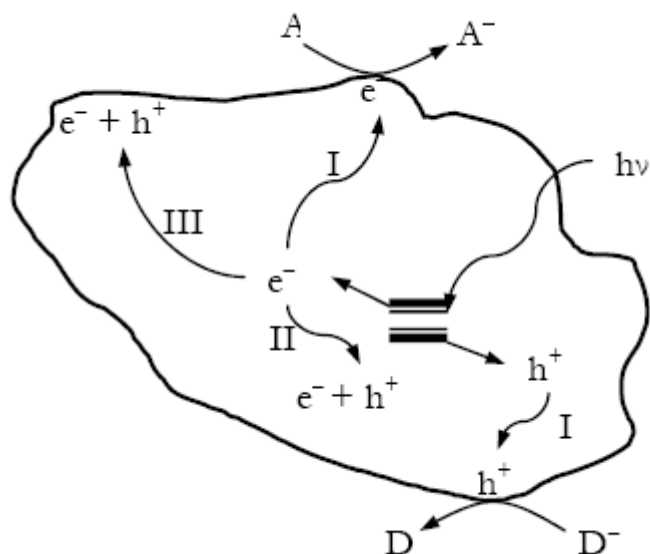
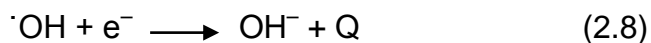
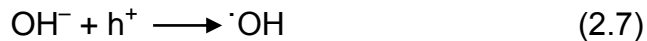


Figura 7. Evolución de los pares  $e^-$  -  $h^+$  dentro de la partícula de un semiconductor



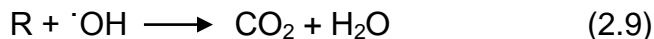
Fuente: (Pizarro de Oro, 2005)

Otros procesos de pérdida de especies activas son, por ejemplo, reacciones cíclicas (2.7) y (2.8) o por interferencia de impurezas o de algunos de los intermedios o productos obtenidos durante el proceso de degradación:



En resumen, la irradiación con un haz de contenido energético apropiado sobre partículas semiconductoras es capaz de generar una serie de agentes oxidantes y reductores con suficiente vida media y reactividad para entrar en contacto con los contaminantes (inorgánicos y orgánicos) a través de la interfase sólido-fluido portador y transformarlos en productos de menor riesgo medioambiental. En el caso de contaminantes de naturaleza orgánica pueden provocar, incluso, su completa mineralización cuya

reacción global de destrucción puede esquematizarse en la reacción (2.9). (Pizarro de Oro, 2005)<sup>75</sup>



El mecanismo de la reacción suele implicar la intervención de especies intermedias procedentes de la transformación del compuesto contaminante, frecuentemente de tipo radicálicas, cuya complejidad y número depende del tipo de molécula a degradar así como de la fase en la que tenga lugar el proceso fotocatalítico.

Puesto que se trata de reacciones interfaciales, en la cinética global del proceso participarán las etapas típicas involucradas en un sistema heterogéneo: transporte de los reaccionantes desde el seno del fluido y adsorción en la superficie del catalizador, reacción en la fase adsorbida y, por último, desorción de los productos para migrar al fluido. La etapa de reacción está regida por la transferencia de cargas a través de la interfase, siendo su fuerza impulsora la diferencia entre el potencial redox de las especies adsorbidas y el correspondiente a los niveles energéticos en los que se sitúan los pares  $e^-$ -  $h^+$  generados en el semiconductor. (Pizarro de Oro, 2005)<sup>76</sup>

5.9.2 Parámetros que influyen en el proceso. Los factores que influyen en el mecanismo y la cinética de una reacción fotocatalítica han sido estudiados en numerosas investigaciones, si bien sólo es posible establecer unas pautas generales debido a la gran variabilidad de las aplicaciones existentes. A continuación se describen de manera general algunos de los más importantes (Pizarro de Oro, 2005)<sup>77</sup>:

- pH. En el tratamiento de efluentes líquidos, dependiendo del pH del medio de reacción, el catalizador presentará diferentes estados superficiales que afectan a su comportamiento como adsorbente y por tanto, a la eficiencia de contacto con las especies participantes en las reacciones. Por otro lado, en el caso de semiconductores de naturaleza anfótera como es el  $TiO_2$ , su punto isoeléctrico está directamente relacionado con la tendencia a la floculación, con lo que una modificación del pH del medio condicionará el estado de agregación de sus partículas. Así mismo, los compuestos a

---

<sup>75</sup> Pizarro de Oro. Op. cit 19

<sup>76</sup> *Ibid.*, p. 20

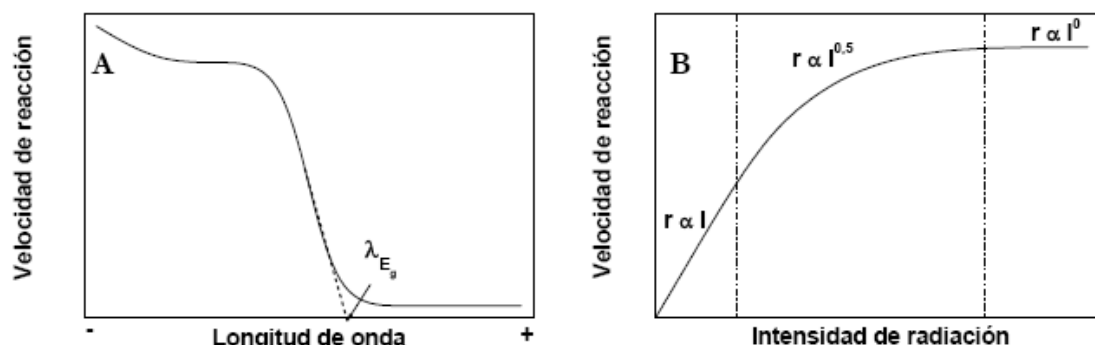
<sup>77</sup> *Ibid.*, p. 20



degradar pueden presentarse en distintas formas químicas, de mayor o menor accesibilidad para el catalizador.

- Temperatura. Dado que la activación del fotocatalizador tiene lugar por absorción de energía radiante, la temperatura del medio de reacción no desempeña un papel relevante en este sentido. No obstante, a partir de ciertas temperaturas puede producirse la excitación térmica generando niveles energéticos ocupados correspondientes a  $E_F + KBT$  (siendo  $E_F$  el nivel de Fermi o potencial químico de los electrones a 0 K en el estado fundamental,  $K$  la constante de Boltzmann y  $T$  la temperatura). Otros parámetros como la solubilidad y volatilidad de los contaminantes y demás especies partícipes ( $O_2$ , aditivos, etc.), o la cinética de adsorción-desorción de las moléculas sobre el catalizador, deben tenerse en consideración a la hora de seleccionar la temperatura de trabajo.
- Presencia de oxígeno. El comportamiento del oxígeno como aceptor de electrones permite el desarrollo de las reacciones fotocatalíticas minimizando los procesos de recombinación de los pares  $e^- - h^+$ , a la vez que no compite con el contaminante por los sitios de adsorción. Diversos estudios han confirmado que la ausencia de  $O_2$  en el medio de reacción conduce a la inactividad del catalizador. En cambio, investigaciones empleando otras sustancias con afinidad electrónica han obtenido actividad concluyendo que el  $O_2$  no es imprescindible para esas condiciones. En cualquier caso, si se suministra  $O_2$  debe asegurarse una presión parcial del mismo constante en todo el proceso, con el fin de no convertir esta variable en la etapa limitante sobre la velocidad global de reacción.
- Fuente de radiación incidente. La fotoactividad de los semiconductores sólo se manifiesta cuando sobre ellos incide radiación cuya energía asociada sea igual o superior a la separación energética entre las bandas de valencia y de conducción. Por ejemplo, en el caso del  $TiO_2$  en su forma cristalina anatasa con un valor de  $E_G$  de 3,2 eV, la longitud de onda umbral ( $\lambda_{EG}$ ) es de 390 nm. A partir de este punto, si se utilizan longitudes de onda inferiores, la velocidad de reacción es independiente y constante, si bien pueden aparecer efectos de ruptura fotolítica de moléculas cuando se emplean radiaciones demasiado energéticas, falseando los resultados obtenidos (Figura 8A). Por otro lado, debe tenerse en cuenta que los propios reaccionantes podrían absorber parte de la radiación útil, lo que supondría una disminución del rendimiento fotónico.

Figura 8. Influencia de la longitud de onda (A) y de la intensidad (B) de la radiación incidente en la velocidad de reacción observada



Fuente: (Pizarro de Oro, 2005)

La intensidad de la radiación utilizada ha de ser suficiente para alcanzar todas las partículas del catalizador y provocar la generación de los pares de carga. Se ha encontrado que la velocidad de reacción es directamente proporcional a la cantidad de fotones absorbidos (Figura 8B), con un comportamiento de orden 1, hasta un determinado valor de intensidad. A partir de este valor el orden parcial pasa de 1 a 0,5 debido a que el aprovechamiento de los fotones empieza a estar limitado por el fenómeno de recombinación de los electrones y huecos. A mayores intensidades de radiación se produce un nuevo cambio a orden cero que indica que el catalizador no puede generar más pares aun cuando aumente el flujo radiante. (Pizarro de Oro, 2005)<sup>78</sup>

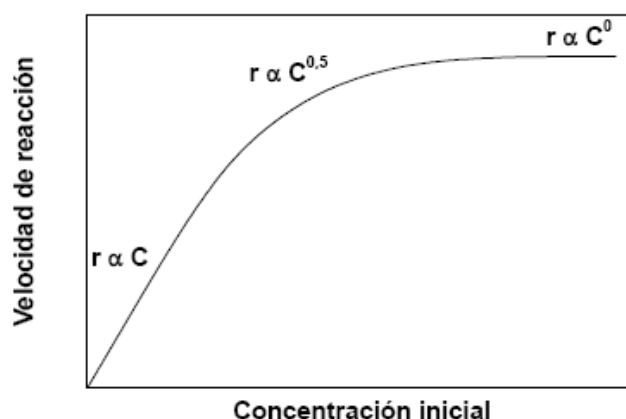
- Naturaleza y concentración del contaminante. El grado de conversión y la velocidad de las reacciones fotocatalíticas están vinculados a la naturaleza del contaminante a degradar, ya que ésta determinará tanto su estabilidad química como la complejidad del mecanismo de reacción. La aparición de productos intermedios puede suponer una contribución importante a la velocidad global del proceso, mediante su participación en las etapas de adsorción-desorción superficial. De manera general, las reacciones fotocatalíticas presentan una cinética de acuerdo con las ecuaciones de tipo Langmuir-Hinshelwood:

$$r = \frac{dC}{dt} = - \frac{k * K * C}{1 + \sum K_i * C_i} \quad (2.10)$$

<sup>78</sup> Pizarro de Oro. Op. cit 21

Siendo  $i$  cada una de las especies adsorbidas en la superficie del catalizador. De acuerdo a la ecuación, según se aumenta la concentración del contaminante, se produce una transición gradual desde un comportamiento de orden uno a otro de orden cero (Figura 9). Los valores de las constantes  $k$  y  $K$  están determinados por las condiciones de reacción (pH, temperatura, catalizador, etc.) así como por la naturaleza del contaminante (composición y estabilidad química). (Pizarro de Oro, 2005)<sup>79</sup>

Figura 9. Influencia de la concentración inicial de contaminantes sobre la velocidad de una reacción fotocatalítica



Fuente: (Pizarro de Oro, 2005)

- **Aditivos.** Es habitual la incorporación al medio de reacción de compuestos con capacidad aceptora de electrones que reducen la recombinación de los pares  $e^- - h^+$ , donde el más efectivo resulta ser el  $O_2$ , seguido de otros como el  $H_2O_2$ ,  $S_2O_8^{2-}$ ,  $O_3$ , etc. En cambio, la presencia de otros aditivos o impurezas pueden ejercer un efecto negativo sobre la eficacia del proceso al competir con el sustrato por los sitios de adsorción del catalizador. Es el caso de aniones como los  $SO_4^{2-}$ ,  $PO_4^{3-}$  y  $Cl^-$  o de cationes como  $Ca^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  y  $Ni^{2+}$ .
- **Catalizador.** El primer aspecto a considerar es la cantidad de catalizador utilizado, puesto que constituye la fuente de generación de los pares de carga reactivos. Es evidente que la velocidad de una reacción fotocatalítica guardará una proporcionalidad directa con la concentración de catalizador, si bien a partir de un valor límite esta dependencia es cada vez menos acusada debido a que los fenómenos de dispersión y apantallamiento de la

<sup>79</sup> Pizarro de Oro. Op. cit 22

radiación comienzan a hacerse significativos impidiendo la completa iluminación del sólido.

Asimismo, las características intrínsecas del catalizador desempeñan un papel importante sobre la eficacia del proceso fotocatalítico:

- **Propiedades cristalinas.** Influyen principalmente sobre la producción de los pares  $e^-$  -  $h^+$  y su disponibilidad para las reacciones redox superficiales. Destacan el grado de cristalinidad del material, las fases cristalinas presentes y proporción de cada una de ellas, así como el tamaño de los cristales. Por ejemplo, de las dos fases cristalinas del  $TiO_2$  más frecuentes, anatasa y rutilo, la primera ofrece los mejores resultados de transformación de contaminantes. Debe entenderse, también, que la presencia de defectos en la estructura del cristal pueden favorecer los procesos de recombinación.
- **Propiedades texturales.** Afectan especialmente a la eficiencia del contacto entre el catalizador y las especies reaccionantes. Por regla general, interesan fotocatalizadores con un área superficial alta y distribución de tamaño de partícula uniforme y forma esférica.
- **Reactor fotocatalítico.** El diseño de los fotorreactores está supeditado a dos dificultades inherentes a la fotocatalisis heterogénea: debe asegurar el perfecto contacto entre dos fases diferentes (sólido-fluido) y permitir la iluminación uniforme de todas las partículas del catalizador. Las configuraciones desarrolladas son diversas, basándose en aspectos como localización de la fuente de radiación (externa o interna), intervalo de longitudes de onda requeridos, operación en continuo o por cargas, en fase líquida o gas, etc.

En la actualidad, la mayor parte de las instalaciones fotocatalíticas han sido diseñadas con fines de investigación, para obtener datos cinéticos y mecanísticos que puedan ser extrapolados al desarrollo de aplicaciones reales futuras. Esta situación supone que las configuraciones disponibles suelen estar bastante alejadas de la viabilidad técnica y económica. Por ejemplo, el empleo de lámparas de UV inhabilita el tratamiento fotocatalítico dado el encarecimiento del proceso, siendo deseable el aprovechamiento de la luz solar como fuente de radiación. Asimismo, los caudales y composición de las corrientes reales a tratar exigen un cambio de escala que afecta al diseño del reactor. (Pizarro de Oro, 2005)<sup>80</sup>

---

<sup>80</sup> Pizarro de Oro. Op. cit 23

## 6. METODOLOGIA

### 6.1 RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA

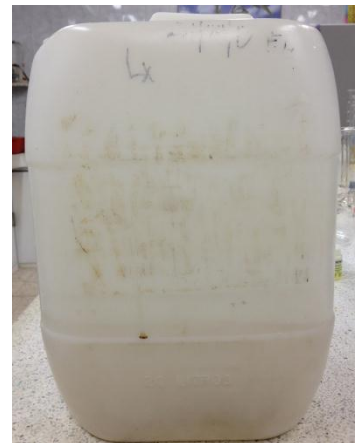
El lixiviado del relleno sanitario “El Henequén”, fue recolectado de la tubería de entrada a la piscina 1, antes del almacenamiento final en las piscinas del Relleno. Se trasladó a los laboratorios de la Universidad de la Costa en un tanque de plástico de 20 litros y luego fueron preservadas para los análisis y montajes experimentales. Cada semana se buscaba una muestra para el proceso experimental.

Imagen 2. Piscina 1 - Relleno Sanitario



Fuente: Google Earth

Imagen 3. Recipiente plástico



Fuente: Autores

## 6.2 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Para la caracterización del lixiviado recolectado para este proyecto de investigación, se tomó como referencia el Standard Methods.

Tabla 10. Parámetros y equipos de medición

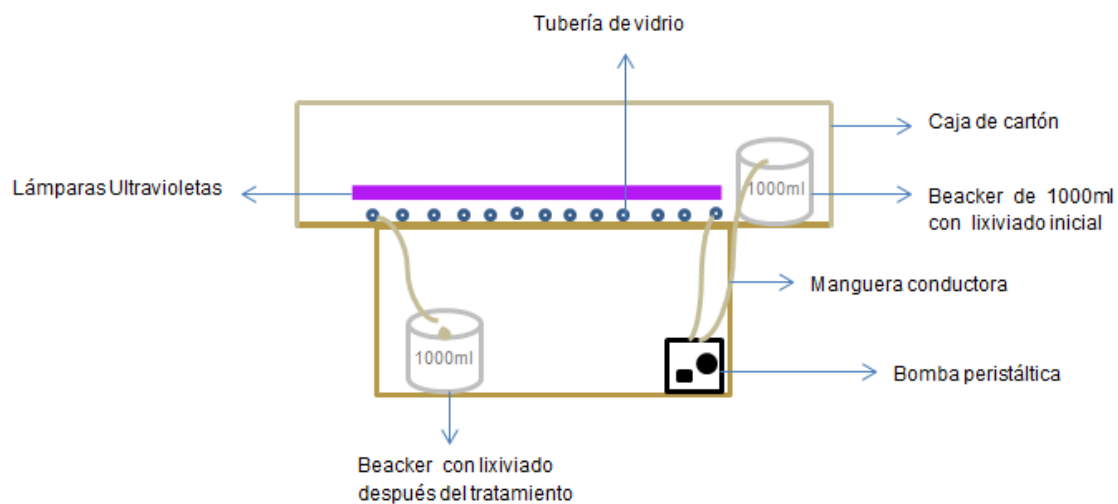
Parámetro	Unidades de medición
pH	
Temperatura	°C
Conductividad Eléctrica	mS
Sólidos Disueltos Totales	g/L
Turbidez	NTU
DQO	mg/L
DBO <sub>5</sub>	mg/L

Fuente: Standard Methods. (1992). (for the examination of water and wastewater. 18a ed. APHA, AWWA, WEF. Washington, DC, EEUU).

## 6.3 PROTOTIPO DE DISEÑO

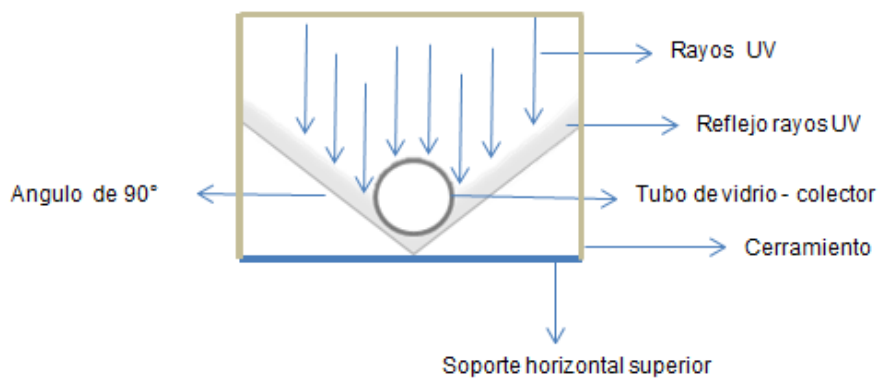
Para la construcción del reactor, tanto para el proceso de Fotocatálisis Heterogénea y Foto Fenton, se consultaron diferentes modelos de reactores comerciales y diseños experimentales. A partir de la información consultada se determinó utilizar el mismo reactor para los dos procesos y el cual se consideró fue el más adecuado debido a que cumplían con las condiciones físicas debido a su comportamiento con los reactivos empleados y de igual forma mantuvo el margen del presupuesto disponible para la compra de materiales.

Diagrama 1. Estructura física del reactor



Fuente: Autores

Diagrama 2. Vista alzada interna del recorrido



Fuente: Autores

## 6.4 CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

El reactor construido es de Tipo Bach a escala laboratorio y el cual lo conforman los siguientes materiales y equipos:

Tabla 11. Materiales y Equipos

<b>Materiales y Equipos</b>	<b>Características</b>	<b>Precio</b>	<b>Cantidad</b>
Madera plana - Machimbre	1 m <sup>2</sup> 1m x 12 cm	\$ 29.900	1
Angulo plástico ajover	90°	\$ 1.600x3m	1
Puntillas de acero	3/4"	\$ 1.200 /doc	26
Papel aluminio	21mts	\$ 5.800	1rollo
Barras de silicona	1/2"	\$ 400c/u	12
Tubo de vidrio	Diámetro externo:5mm Diámetro interno: 3mm Gruoso de pared del tubo : 1mm	\$ 72.000x3mts	3½mts
Manguera comercial	3/4 "	Disponible	2 mts
Bomba peristáltica – Masterflex C/L	Modelo 77122-22 – 12 VDC 2.4 AMP	Disponible	1 und
Lámpara Ultra Violeta	T1020W BLB 110V60Hz	\$ 15.000 c/u	3 und
Soporte para lámparas	T81x20w	\$ 9.000 c/u	3 und
Lamicel perol	Black out - 2mm	\$ 7.758xm <sup>2</sup>	1m <sup>2</sup>
Beacker	1000 ml	Disponible	2 und

Fuente: Autores

## 6.5 PARÁMETROS OPERATIVOS

Debido a que el diseño de experimental se calculó para un reactor a escala laboratorio, se tomaron en cuenta diferentes factores tales como la disponibilidad y capacidad volumétrica de la bomba peristáltica y la tubería de vidrio. Debido a esto se manejó un caudal 9ml/min ya que la capacidad de la bomba es de 75 ml con un tiempo de retención hidráulica de 8:23min.



## 6.6 CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR TIPO BACH

Se inició cortando la madera plana (Machimbre) para construir el soporte horizontal superior del reactor que tiene 91cm de largo y 40 cm de ancho, luego se realizaron 2 cortes iguales de 30cmx30cm y se instalaron de forma vertical y 1 corte de 30cmx48cm que se instaló de forma horizontal inferior, esta última sirviendo de apoyo al soporte horizontal superior y de base del reactor.

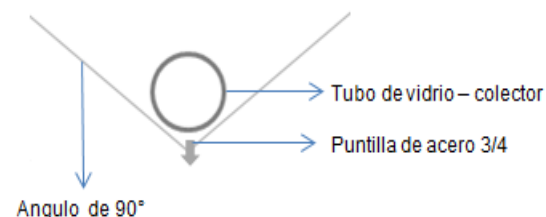
Imagen 4. Estructura física del reactor



Fuente: Autores

Luego, se cortaron de la pieza del ángulo de plástico ajover 11und de 30cm de largo cada uno y se fijaron con puntillas de acero de 3/4" en el soporte de madera horizontal superior a una distancia de 5cm cada uno a partir del eje. Se determinó este tipo de ángulo debido a que lo que se requería era que fuera de modo colector de la radiación artificial y además brindarle estabilidad al tubo de vidrio.

Diagrama 3. Vista Alzada



Fuente: Autores

Imagen 5. Instalación de Ángulos de 90°



Fuente: Autores

A partir de la estructura armada, se procedió a cubrir con papel aluminio (reforzado con silicona), los ángulos de 90° en el soporte horizontal superior con el fin de que sirva de superficie reflectora tipo espejo en V a partir de la radiación de las lámparas Ultravioleta.

Imagen 6. Cubrimiento de ángulos



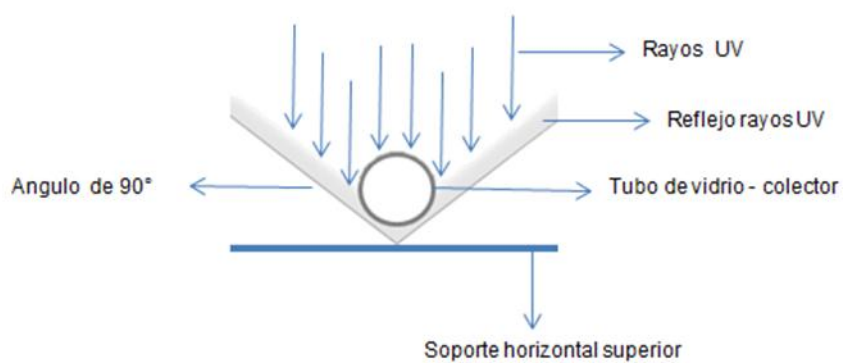
Fuente: Autores

Imagen 7. Cubrimiento de ángulos



Fuente: Autores

Diagrama 4. Vista alzada interna del reactor



Fuente: Autores

Luego, se cortó el tubo de vidrio de 3½”mts de largo en 11und de 30cm cada una, para que el recorrido conste de 10 vueltas unidos por manguera que sirve de conector entre cada tubo colector de vidrio.

Imagen 8. Recorrido de reactor



Fuente: Autores

Ya teniendo la estructura física del reactor terminada, se procede a forrar la parte interna de una caja de cartón de 91 cm de largo x 40 cm de ancho con el Lamicel perol, que sirve de ayuda para proporcionar una concentración tanto de la radiación con lámparas UV como de la temperatura interna en todo el proceso.

Imagen 9. Recubrimiento con tela lamicel Perol



Fuente: Autores

Antes de realizar las pruebas del lixiviado con reactivos, se realizaron pruebas preliminares del recorrido con agua aplicándole color vegetal, con el fin de identificar más fácilmente fugas en el recorrido del reactor.

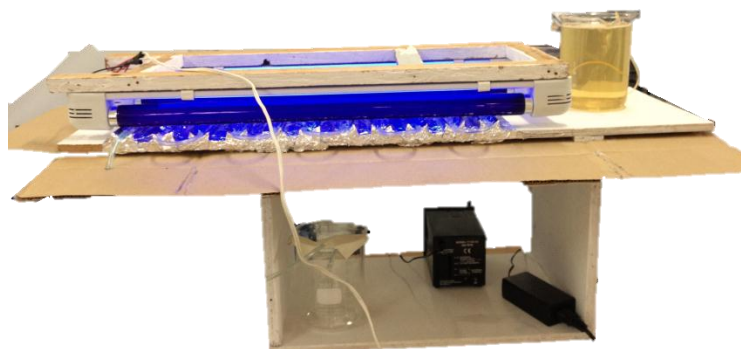
Imagen 10. Pruebas preliminares



Fuente: Autores

## 6.7 DISEÑO FINAL DEL REACTOR

Imagen 11. Reactor final - Tipo Bach



Fuente: Autores

Imagen 12. Vista externa del reactor



Fuente: Autores

Imagen 13. Vista en planta del recorrido interno del reactor



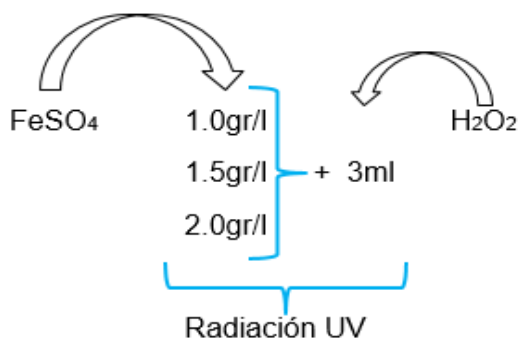
Fuente: Autores

## 6.8 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se tuvieron en cuenta diferentes metodologías y experiencias para concretar y determinar los rangos con mejor eficiencia para los procesos Foto Fenton y Fotocatálisis Heterogénea.

6.8.1 Proceso Foto Fenton. Para el desarrollo de este proceso se realizaron consultas a experiencias ya realizadas con este tipo de tratamiento POA (Otero Rozzo., 2013)<sup>81</sup>, a partir de allí y con el fin de optimizar los procesos empleados, se analizaron los amplios rangos de Sulfato Ferroso y Peróxido de Hidrógeno utilizados en esta experiencia, en los cuales se tuvieron en cuenta los porcentajes de remoción de DQO y desde ese punto de vista se seleccionaron los rangos que tuvieron mejor comportamiento y se determinaron rangos más reducidos dando como resultado los siguientes concentraciones posiblemente óptimas:

Diagrama 5. Concentraciones para el proceso Foto Fenton



Fuente: Autores

Para la realización y puesta en marcha del equipo para el proceso Foto Fenton se aplicaron los reactivos, Sulfato Ferroso ( $\text{FeSO}_4$ ) y Peróxido de Hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) este último a una concentración del 30%, el tiempo de exposición del proceso a rayos UV es de 382 nm, la cual es una fuente suficiente para excitar a los reactivos catalizadores.(Fernandez Ibañez)<sup>82</sup>.

<sup>81</sup> Otero Rozzo., Op. cit., p. 72, 84

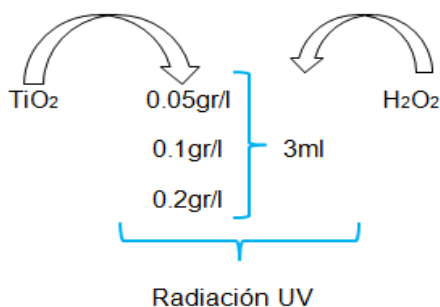
<sup>82</sup> Fernández Ibáñez, Pilar., Propiedades coloidales de partículas de  $\text{TiO}_2$ : Aplicación al tratamiento foto catalítico solar de aguas, España. Pág., 97



Luego se procedió a realizar el proceso de neutralización con el reactivo de Hidróxido de Sodio (NaOH) a una concentración del 32% para el cumplimiento del parámetro de pH establecido en el Decreto 3930 de 2010.

6.8.2 Proceso Fotocatálisis Heterogénea. En el proceso Foto Catalítico se determinaron los valores a partir de las experiencias documentadas [(Fernandez Ibañez)<sup>83</sup>, (Pey Clemente)<sup>84</sup>], donde utilizaron concentraciones menores a 0.2 gr/L de  $\text{TiO}_2$ , ya que a esta concentración se presentaban los mayores porcentajes de remoción de DQO, además de esto, al utilizar una mayor concentración de este catalizador, se presentaban inconvenientes operacionales en el reactor. A partir de allí se determinaron las siguientes concentraciones:

Diagrama 6. Concentraciones para el proceso de Fotocatálisis Heterogénea



Fuente: Autores

Para el desarrollo del proceso Foto Catalítico se utilizó el Dióxido de Titanio  $\text{TiO}_2$  p120, comercial y de fácil acceso, además se utilizó Peróxido de Hidrogeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) este último a una concentración del 30%.

Luego se procedió a realizar el proceso de neutralización con el reactivo de Hidróxido de Sodio (NaOH) a una concentración del 32% para el cumplimiento del parámetro de pH establecido en el Decreto 3930 de 2010.

<sup>83</sup> Fernández Ibáñez, Op. cit., p. 274

<sup>84</sup> Pey Clemente, Op. cit., p. 56.

## 7. RESULTADOS

### 7.1 PROCESO DE FOTO FENTON

Se tuvieron en cuenta los datos registrado en el lixiviado inicial que es la columna de entrada, la columna de salida donde se registra la muestra de lixiviado en la salida del proceso y la columna de neutralización la que indica los resultados obtenidos con la aplicación de Hidróxido de Sodio para el cumplimiento del parámetro de pH que estipula el Decreto 3930 de 2010.

Tabla 12. Valores de  $\text{FeSO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$  en la muestra 1

<b>1000 mg/L <math>\text{FeSO}_4</math> + 3 mg/L <math>\text{H}_2\text{O}_2</math></b>			
	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Neutralización</b>
pH	7,1	2,94	6,45
Temperatura °C	30,9	24,4	22,9
Conductividad eléctrica mS	21,79	21,14	20,48
Turbidez UNT	5,25	9,21	20,6
DQO mg/L	669,8	2,4	874
SST mg/L	12,62	13,88	13,94



Tabla 13. Valores de  $\text{FeSO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$  en la muestra 2

<b>1500 mg/L <math>\text{FeSO}_4</math> + 3 mg/L <math>\text{H}_2\text{O}_2</math></b>			
	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Neutralización</b>
pH	7,10	3,56	6,76
Temperatura °C	30,9	29,2	25,1
Conductividad eléctrica mS	21,79	21,40	20,51
Turbidez UNT	5,25	129	24,7
DQO mg/L	669,8	269,4	516
SST mg/L	12,62	13,94	13,92

Tabla 14. Valores de  $\text{FeSO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$  en la muestra 3

<b>2000 mg/L <math>\text{FeSO}_4</math> + 3 mg/L <math>\text{H}_2\text{O}_2</math></b>			
	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Neutralización</b>
pH	7,10	2,8	6,74
Temperatura °C	29,3	24,2	24,15
Conductividad eléctrica mS	19,88	20,71	20,14
Turbidez UNT	4,09	7,07	12,3
DQO mg/L	26,82	69,16	46,32
SST mg/L	12,62	13,91	12,93

## 7.2 PROCESO DE FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA

Se tuvieron en cuenta los datos registrado en el lixiviado inicial que es la columna de entrada, la columna de salida donde se registra la muestra de lixiviado en la salida del proceso y la columna de neutralización la que indica los resultados obtenidos con la aplicación de Hidróxido de Sodio para el cumplimiento del parámetro de pH que estipula el Decreto 3930 de 2010.

Tabla 15. Valores de  $\text{TiO}_2$  en la muestra 1

<b>0.05 mg/L <math>\text{TiO}_2</math></b>			
	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Neutralización</b>
pH	7,29	3,18	7,32
Temperatura °C	28,8	27,25	25,25
Conductividad eléctrica mS	19,34	20,80	20,135
Turbidez UNT	3,71	88,2	72,85
DQO mg/L	603,2	135,88	33,37
SST mg/L	12,52	13,12	13,09

Tabla 16. Valores de  $\text{TiO}_2$  en la muestra 2

<b>0.1mg/LTiO<sub>2</sub></b>			
	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Neutralización</b>
pH	7,29	3,33	7,3
Temperatura °C	28,8	28,15	24,15
Conductividad eléctrica mS	19,34	21,17	20,11
Turbidez UNT	3,71	130,5	98,7
DQO mg/L	603,2	135,9	169,3
SST mg/L	12,52	13,12	13,27

Tabla 17. Valores de  $\text{TiO}_2$  en la muestra 3

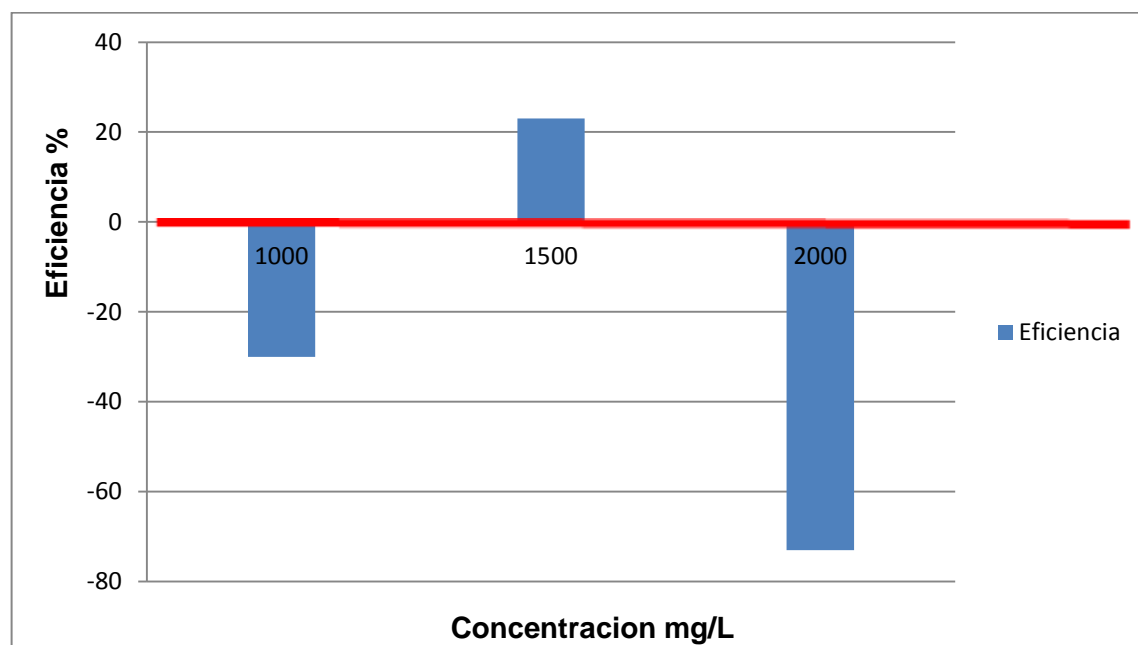
<b>0.2 mg/LTiO<sub>2</sub></b>			
	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Neutralización</b>
pH	7,29	3,08	7,15
Temperatura °C	28,8	27,4	22,4
Conductividad eléctrica mS	19,34	21,1	19,51
Turbidez UNT	3,71	288	180,5
DQO mg/L	603,2	2,4	503
SST mg/L	12,52	13,18	13,37

## 8. ANALISIS DE RESULTADOS

Tabla 18. Porcentajes de remoción Proceso Foto Fenton

Parámetro	Concentración	Porcentaje de Remoción
DQO	1000 mg/L $\text{FeSO}_4$ + 3 mg/L $\text{H}_2\text{O}_2$	-30%
	1500 mg/L $\text{FeSO}_4$ + 3 mg/L $\text{H}_2\text{O}_2$	23%
	2000 mg/L $\text{FeSO}_4$ + 3 mg/L $\text{H}_2\text{O}_2$	-73%

Gráfica 1. Concentración vs Eficiencia del proceso Foto Fenton

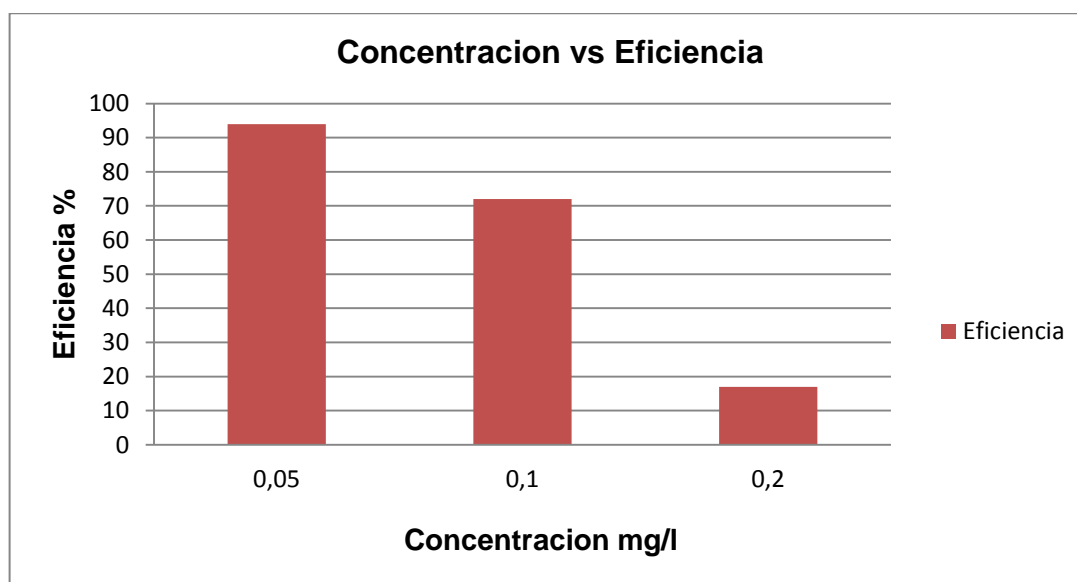


En la anterior gráfica se puede observar que el sulfato ferroso a concentración de 1500 mg/L tuvo un mayor porcentaje de remoción de DQO (23%) en el lixiviado tratado, a diferencia de las concentraciones de 1000 mg/L y 2000mg/L, donde se observa un incremento de la DQO, debido a que a mayor concentración del reactivo aumenta la turbiedad de la disolución de tal manera que no permite la adsorción de luz ultravioleta en el proceso impidiendo la reacción de los reactivos con la muestra.

Tabla 19. Porcentaje de remoción Proceso Fotocatálisis Heterogénea

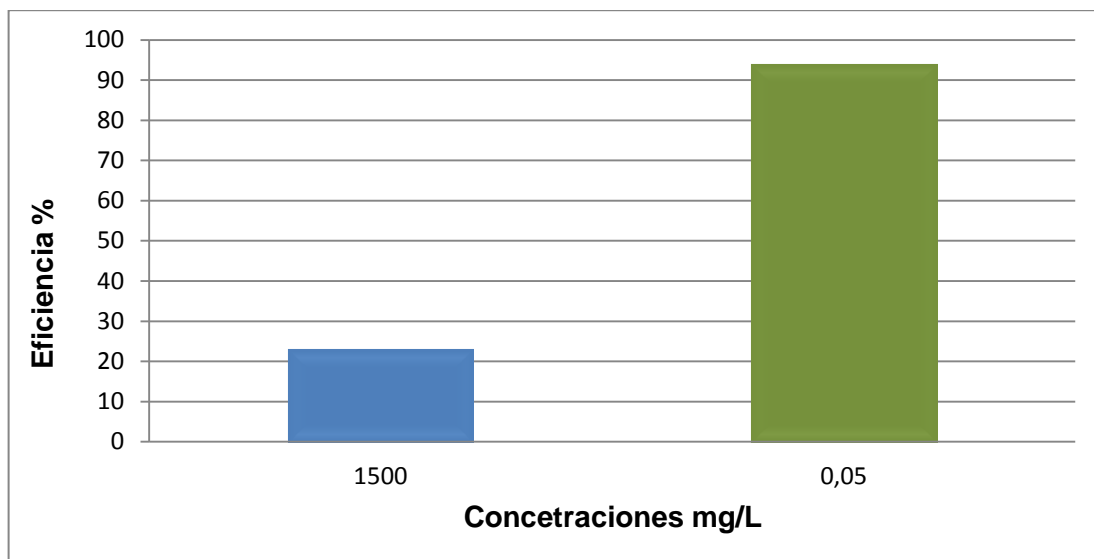
Parámetro	Concentración	Porcentaje de Remoción
DQO	0.05 mg/L $\text{TiO}_2$	94%
	0.1 mg/L $\text{TiO}_2$	72%
	0.2 mg/L $\text{TiO}_2$	17%

Gráfica 2. Concentración vs Eficiencia del proceso Fotocatálisis Heterogénea



En la anterior gráfica se puede observar el comportamiento del  $\text{TiO}_2$  para el tratamiento del lixiviado., el cual se puede observar que a menor concentración de este catalizador mayor va a ser su eficiencia de remoción de DQO, esto podría deberse a unos factores que consisten en mayor actividad de reacción del reactivo con las moléculas del lixiviado por medio de los rayos UV.

Gráfica 3. Comparación de los procesos: Foto Fenton y Fotocatálisis Heterogénea en la remoción de DQO



Como se puede observar en la gráfica anterior el mayor porcentaje de remoción de DQO se obtuvo con el proceso de Fotocatálisis Heterogénea donde se empleó el Dióxido de Titanio con una concentración de 0.05 gr/L, removiendo un 94%.

## 9. CONCLUSION

De la evaluación de los procesos de Foto Fenton y Fotocatálisis Heterogénea se puede concluir que:

- El mayor porcentaje de remoción de DQO obtenido en el proceso Foto Fenton, el cual arrojó un 23% a una concentración de 1500 mg/L de sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ ). Convirtiendo este proceso en no eficaz para el tratamiento del lixiviado maduro en esta experiencia.
- El proceso de fotocatálisis heterogénea fue el tratamiento que permitió el mayor porcentaje de remoción de DQO en esta experiencia el cual se obtuvo un 94% a una concentración de 0.05 mg/L de Dióxido de Titanio  $\text{TiO}_2$ , por lo cual este proceso se convirtió en el más adecuado para su aplicación en el tratamiento de lixiviado maduro.
- De acuerdo a la eficiencia de remoción de DQO obtenido en esta experiencia con los dos procesos desarrollados, se observó que en el procesos con  $\text{TiO}_2$ , hubo mejor comportamiento para la remoción de DQO, a diferencia del  $\text{FeSO}_4$ , el cual se pudo observar un leve y mínimo porcentaje de remoción convirtiendo este proceso complejo para el tratamiento de lixiviados de este tipo.
- Según el costo de los reactivos empleados, el  $\text{TiO}_2$  es de mayor asequibilidad económica debido a su bajo costo comercial y además es un producto que permite su reutilización en el proceso de remoción de DQO sin perder su efectividad.

## **10.RECOMENDACIONES**

Para el desarrollo de proceso Foto Fenton y Fotocatálisis Heterogénea se recomienda:

- Para reactores escala laboratorio se recomienda triturar los cristales de sales de hierro, con el fin de obtener una mayor dilución en el lixiviado y evitar la obstrucción en la tubería.
- Realizar procesos de agitación magnética y no manual, con el propósito de homogenizar el producto en toda la muestra de lixiviado.
- Cuando se trabaje con una fuente de luz artificial, se recomienda que antes de iniciar el recorrido en el proceso se conecte a un interruptor para que las lámparas adquiera una temperatura uniforme en el reactor.
- Realizar un cubrimiento del recorrido en el reactor para lograr la mayor concentración de la radiación en el interior del proceso.



## BIBLIOGRAFÍA

ALIAGA SIMORTE, Sonia. Aplicacion del proceso Fenton y Coagulación-Floculación para la regeneracion de aguas depuradas. Zaragoza, 2010, 19-29 p. Proyecto fin de carrera. Escuela Universitaria de Ingenieria Tecnica Industrial de Zaragoza. Departamento de Ingenieria Quimica y Tecnologias del Medio Ambiente.

AMOKRANE, A. COMEL, C. VERON, J. Landfill leachate by coagulation - flocculation. En: Water Research. Vol.; 31. No 11 (Nov 1997); p. 2775-2782.

BAE, J.H. Kim, S.K. CHANG, H.S. Treatment of landfill leachates: ammonia removal via nitrification and denitrification and further COD reduction via fenton's treatment followed by activated sludge. En: Water Science and Technology. Vol.; 36. No 12 (1997); p. 341-348.

CERDA SANDOVAL, Ivonne. Aplicacion de Foto fenton a lixiviados de rellenos sanitarios. Jiutepec, 2007, 2-9 - 2-17 p. Tesis de grado ( Maestro en Ingeniería). Universidad Nacional Autonoma de Mexico. Facultad de Ingeniería.

RUBIANO H, Claudia Marcela. LAGUNA C, William Alejandro. ZAPATA S, Carmen Elena. MARIN S, Juan Miguel. Estudio sobre las posibilidades de aplicacion de la fotocatalisis heterogenea a los procesos de remocion de fenoles en medio acuoso. En: Red de Revistas Cientificas de America Latina, el Caribe y España y Portugal. Vol.; 8. No 1 (2005); p. 106-107.

DOMÉNECH, X. JARDIM, W.F. LITTER, M.I. Procesos avanzados de oxidación para la eliminacion de contaminantes. En: Eliminación de contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea. (2001); p. 3-25.

GIRALDO, Eugenio. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances Recientes. En: Revista de Ingeniería. No 14; ( Nov 2001); p. 44-45.

ESCUADERO SANTIAGO, Carlos Javier. Tratamiento de lixiviados provenientes de un vertedero de residuos solidos urbanos mediante la aplicación de sistemas fisicoquimicos a escala laboratorio. Guanajuato, 2012, 14-45 p. Tesis de grado (

Maestro en ciencias del agua). Universidad de Guanajuato. División de Ingenierías.

FERNANDEZ IBAÑEZ, Pilar. Propiedades Coloidales de partículas de  $\text{TiO}_2$ : Aplicación al tratamiento fotocatalítico solar de aguas. Granada, 2003, 97 p. Tesis Doctoral (Ciencias Físicas). Universidad de Granada. Departamento de Física Aplicada.

MUÑOZ SANTIBAÑEZ, Alejandro Enrique. Proceso Fenton y Foto-Fenton para la remoción de fenoles de efluentes generados en una planta de celulosa Kraft. Viçosa, 2011, 7p. Tesis de grado (Maestro en Ciencias). Universidad Federal de Viçosa.

OTERO ROZZO, Angelica. Determinación de la eficiencia de la remoción de la DQO del lixiviado maduro del relleno El Henequen tratado con oxidación avanzada foto-fenton. Barranquilla, 2012, 72-84 p. Tesis de grado (Ingeniero Ambiental). Universidad de la Costa, CUC. Facultad de Ciencias Ambientales.

PEY CLEMENTE, Jaime. Aplicación de procesos de oxidación avanzada (Fotocatalisis solar) para tratamiento y reutilización de efluentes textiles. Valencia, 54-56p. Tesis de grado. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería textil y papelera.

PIZARRO DE ORO, Patricia. Desarrollo de materiales basados en  $\text{TiO}_2$  mesoestructurado con aplicaciones fotocatalíticas. Madrid, 2005, 16-23 p. Tesis Doctoral (Doctor en Tecnología Química, Ambiental y de los Materiales). Universidad Rey Juan Carlos. Departamento de Tecnología Química y Ambiental.

PRIMO MARTINEZ, Oscar. Mejoras en el tratamiento de lixiviados de vertederos de RSU mediante procesos de oxidación avanzada. Cantabria, 2008, 137-140 p. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. Departamento de Ingeniería Química y Química Inorgánica.

RENOU, S. GIVAUDAN, J. POULAIN, S. DIRASSOUYAN, F. MOULIN, P. Landfill leachate treatment. En: Journal of Hazardous materials. No 150; p. 468 - 493.

TCHOBANOGLIOUS, G. THEISEN, H. VIGIL, S. Gestion integral de residuos solidos. Madrid: McGraw-Hill, 1994.

WANG, F. SMITH, D.W. GAMAL, M. Application of advanced oxidation methods for landfill leachate treatment. En: Journal of Environmental Engineering Science/Rev. Gen. Sci. Env. Vol.; 2. No 6; p. 413 - 427.

## ANEXO 1

### CARTA DE ENTREGA Y AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO DE TESIS Y TRABAJOS DE GRADO

Barranquilla, 22 de Octubre de 2014

Tesis ☐ Marque con una X Trabajo de Grado ☒

Yo, Katherine Fátima Buzón Herrera, identificado con C.C. No. 22.585.785 de Puerto Colombia, actuando en nombre propio y como autor de la tesis y/o trabajo de grado titulado "COMPARACIÓN DE LA APLICACIÓN DE DOS PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA: FOTOFENTON Y FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA EN LA REMOCIÓN DE DQO DE LIXIVIADO MADURO DEL RELLENO SANITARIO EL HENEQUÉN" presentado y aprobado en el año 2014 como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental; hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (DVD) y autorizo a la UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento.

Y autorizo a la Unidad de información, para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad de la Costa, CUC, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web de la Facultad, de la Unidad de información, en el repositorio institucional y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la institución y Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato DVD o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

El AUTOR - ESTUDIANTES, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad ante la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL ESTUDIANTE - AUTOR, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos, la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Barranquilla D.E.I.P., a los 22 días del mes de Octubre de Dos Mil Catorce 2014.

EL AUTOR - ESTUDIANTE. Katherine Buzón Herrera  
FIRMA



**CARTA DE ENTREGA Y AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA CONSULTA,  
LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL  
TEXTO COMPLETO DE TESIS Y TRABAJOS DE GRADO**

Barranquilla, 22 de Octubre de 2014

Tesis ☐ Marque con una X Trabajo de Grado ☒

Yo, Andrea Carolina Ponce Arroyo, identificado con C.C. No. 1.129.511.971 de Barranquilla, actuando en nombre propio y como autor de la tesis y/o trabajo de grado titulado "COMPARACIÓN DE LA APLICACIÓN DE DOS PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA: FOTOFENTON Y FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA EN LA REMOCIÓN DE DQO DE LIXIVIADO MADURO DEL RELLENO SANITARIO EL HENEQUÉN" presentado y aprobado en el año 2014 como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental; hago entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (DVD) y autorizo a la UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento.

Y autorizo a la Unidad de información, para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad de la Costa, CUC, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web de la Facultad, de la Unidad de información, en el repositorio institucional y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la institución y Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato DVD o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

EL AUTOR - ESTUDIANTES, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad ante la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL ESTUDIANTE - AUTOR, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos, la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Barranquilla D.E.I.P., a los 22 días del mes de Octubre de Dos Mil Catorce 2014.

EL AUTOR - ESTUDIANTE.

Andrea Ponce Arroyo  
FIRMA

## ANEXO 2

### FORMULARIO DE LA DESCRIPCIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO COMPLETO DE LA TESIS O TRABAJO DE GRADO:

“COMPARACIÓN DE LA APLICACIÓN DE DOS PROCESOS DE OXIDACIÓN AVANZADA: FOTOFENTON Y FOTOCATÁLISIS HETEROGÉNEA EN LA REMOCIÓN DE DQO DE LIXIVIADO MADURO DEL RELLENO SANITARIO EL HENEQUÉN”.

AUTOR AUTORES

Apellidos Completos	Nombres Completos
Buzón Herrera Ponce Arroyo	Katherine Fátima Andrea Carolina

DIRECTOR (ES)

Apellidos Completos	Nombres Completos
Bernal Higuita	Faisal Yamil

JURADO (S)

Apellidos Completos	Nombres Completos
Vásquez Núñez Cantero Rodelo	Geinny del Carmen Rubén Darío

ASESOR (ES) O CODIRECTOR

Apellidos Completos	Nombres Completos

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO AMBIENTAL

**FACULTAD:** CIENCIAS AMBIENTALES

**PROGRAMA:** Pregrado \_\_X\_\_ Especialización \_\_\_\_

**NOMBRE DEL PROGRAMA:** INGENIERIA AMBIENTAL

CIUDAD: Barranquilla

AÑO DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO: 2014

NÚMERO DE PÁGINAS \_\_\_\_\_

**TIPO DE ILUSTRACIONES:**

☐

Ilustraciones

☐

Planos

☐

Láminas

☐

Mapas

☐

Retratos

☐

Fotografías

☒

Tablas, gráficos y diagramas

**MATERIAL ANEXO** (Vídeo, audio, multimedia o producción electrónica):

Duración del audiovisual: \_\_\_\_\_ minutos.

Número de casetes de vídeo: \_\_\_\_\_ Formato: VHS \_\_\_\_ Beta Max \_\_\_\_  $\frac{3}{4}$  \_\_\_\_ Beta Cam

\_\_\_\_ Mini DV \_\_\_\_ DV Cam \_\_\_\_ DVC Pro \_\_\_\_ Vídeo 8 \_\_\_\_ Hi 8 \_\_\_\_

Otro. Cuál? \_\_\_\_\_

Sistema: Americano NTSC \_\_\_\_\_ Europeo PAL \_\_\_\_\_ SECAM \_\_\_\_\_

Número de casetes de audio: \_\_\_\_\_

Número de archivos dentro del DVD (En caso de incluirse un DVD diferente al trabajo de grado):  
\_\_\_\_\_

**PREMIO O DISTINCIÓN** (En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial):  
\_\_\_\_\_

**DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:** Son los términos que definen los temas que identifican el contenido. (En caso de duda para designar estos descriptores, se recomienda consultar con la Unidad de Procesos Técnicos de la Unidad de información en el correo biblioteca@cuc.edu.co, donde se les orientará).

**ESPAÑOL**

Oxidación avanzada, Lixiviado, Foto Fenton, Fotocatálisis Heterogénea, Demanda Química de Oxígeno (DQO)

**INGLÉS**

Advanced Oxidation, Leaching, Photofenton, Heterogeneous Photocatalysis Chemical Oxygen Demand (COD).

**RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS:**(Máximo 250 palabras-1530 caracteres):

## **RESUMEN**

El siguiente proyecto de investigación se realizó con la finalidad de evaluar y compararla eficiencia de dos procesos de oxidación avanzada utilizando una fuente de luz artificial para la remoción de DQO para el tratamiento de lixiviados maduros. Los procesos aplicados fueron Foto Fenton y Fotocatálisis Heterogénea, los cuales dieron como resultado porcentajes positivos en el índice de reducción de DQO. Además de esto, contiene sistema metodológico para el diseño y construcción de un reactor experimental escala laboratorio tipo Bach.

## **ABSTRACT**

The following research project was conducted in order to evaluate and compare the efficiency of two advanced oxidation processes using an artificial light source for COD removal for the treatment of mature leachate. Processes were applied fenton and photo heterogeneous photocatalysis, which resulted in positive index percentages of reduction of COD. Besides this, contains a methodological framework for the design and construction of a laboratory scale experimental reactor type Bach.